



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

선박적용을 위한 광섬유 브래그 격자형 수위
모니터링 센서 시스템 개발

Water level monitoring sensor systems using
the Fiber Bragg grating for applying the vessel

指導教授 沈 俊 煥



2009年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電子通信工學科

金 鎮 旭

本 論文 金鎮旭의 工學碩士
學位論文으로 認准함.

委員長：梁圭植（印）

委 員：金基文（印）

委 員：沈俊煥（印）

2009年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電子通信工學科

목 차

Abstract

제 1장 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적 및 내용	2
제 2 장 FBG 센서	5
2.1 광섬유 구조와 센서 종류	5
2.2 광섬유 센서의 복조기술	7
2.3 FBG	9
제 3 장 FBG 센서의 온도 변화 및 변형률 측정 실험	18
3.1 실험 개요	18
3.2 FBG 센서 온도 변화 측정 실험	18
3.3 FBG 센서 변형률 측정 실험	20
제 4 장 FBG 센서의 수위 검출기 실험	30
4.1 실험 개요 및 방법	30
4.2 실험 결과 및 분석	42
제 5 장 FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템 개발	43
5.1 실험 개요 및 방법	43
5.2 실험 결과 및 고찰	48
제 6 장 결론	50
참 고 문 헌	52

표 목 차

<표 2-1> 광섬유 구조, 재료 및 직경	6
<표 3-1> FBG 센서 온도 변화에 따른 중심파장과 변형률	20



그 림 목 차

<그림 2-1> 광섬유 구성 요소의 계략도	6
<그림 2-2> 전반사의 원리를 이용한 광섬유의 신호전달 원리	7
<그림 2-3> 광섬유 복조 방식	8
<그림 2-4> 광섬유 브래그 격자의 구조 및 동작 특성	10
<그림 2-5> 광섬유 브래그 격자 센서의 중심파장 부호화 방법	11
<그림 2-6> Ar+레이저에 의해 발생한 정상파로 형성된 광섬유 격자	14
<그림 2-7> 홀로그래픽 방법에 의한 광섬유 격자 형성	15
<그림 2-8> 위상 마스크에 의한 광섬유 격자의 형성	17
<그림 3-1> FBG 센서의 온도 변화를 위한 실험 장치	18
<그림 3-2> FBG 센서의 온도 변화에 따른 중심파장과 광세기 관계 스펙트럼	19
<그림 3-3> FBG 센서의 온도 변화에 따른 중심파장 분석	19
<그림 3-4> FBG 센서의 변위 변화에 따른 변형률 측정 시스템	21
<그림 3-5> 고정점의 위치와 캔틸레버 변위에 대한 FBG 센서 중심파장 이동을 보여주는 스펙트럼	22
<그림 3-6> 고정점의 위치와 캔틸레버의 변위 변화에 대한 FBG 센서 중심파장 이동과 변형률 관계 분석	25
<그림 3-7> FBG 센서 이동 변위 변화에 따른 변형률 측정 시스템	26
<그림 3-8> FBG 센서 이동 변위 변화에 대한 FBG 센서 중심 파장 이동을 보여주는 스펙트럼	27
<그림 3-9> FBG 센서의 변위 변화에 따른 중심 파장 이동과 변형률 관계 분석	27
<그림 4-1> 캔틸레버 위 부분에 FBG 센서 Package	31
<그림 4-2> 캔틸레버 아래 부분에 FBG 센서 Package	31

<그림 4-3> 캔틸레버 옆 부분에 FBG 센서 Package	31
<그림 4-4> FBG 센서의 수위 검출기 실험 장치	32
<그림 4-5> FBG 센서를 캔틸레버 위 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼	32
<그림 4-6> FBG 센서를 캔틸레버 위 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼 분석	34
<그림 4-7> FBG 센서를 캔틸레버 아래 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼	36
<그림 4-8> FBG 센서를 캔틸레버 아래 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼 분석	38
<그림 4-9> FBG 센서를 캔틸레버 옆 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변 화에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼	39
<그림 4-10> FBG 센서를 캔틸레버 옆 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼 분석	41
<그림 5-1> FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템	44
<그림 5-2> FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템 실험에 사용된 장비 구성	44
<그림 5-3> FBG 센서를 캔틸레버 위 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변 화에 따른 실시간 모니터링 시스템	45
<그림 5-4> FBG 센서를 캔틸레버 위 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변 화에 따른 실시간 모니터링 시스템서 나온 데이터 분석	45
<그림 5-5> FBG 센서를 캔틸레버 아래 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 실시간 모니터링 시스템	46
<그림 5-6> FBG 센서를 캔틸레버 아래 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 실시간 모니터링 시스템에서 나온 데이터 분석	46
<그림 5-7> FBG 센서를 캔틸레버 옆 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변 화에 따른 실시간 모니터링 시스템	47

<그림 5-8> FBG 센서를 캔틸레버 옆 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 실시간 모니터링 시스템에서 나온 데이터 분석 47



요 약

본 연구에서는 광학적 방법에 의한, 광섬유 브래그 격자형 수위 모니터링 센서 시스템을 고안하고 유용성을 검토해 보았다.

광섬유 브래그 격자형 수위 모니터링 센서 시스템은 광섬유 브래그 격자, 캔틸레버(cantilever), Buoy이라는 3가지 실험 도구에 의해 광섬유 브래그 격자의 굴절률이 변화는 것을 이용한 것이다. 물탱크 속 수위의 증가 변화에 따라 광섬유 브래그 격자의 광이 장파장으로 굴절되고, 물탱크 속 수위의 감소의 경우는 광이 단파장으로 굴절되어 광검출기(Photodetector)에 광원이 도달되어 전기적인 신호 전압으로 변하여 감지하는 형태이다.

기존의 Ultrasonic type, Electric Pressure type 등은 선박의 각종 Tank의 Level 측정용 장비로 응용 발전되어 왔다. Ultrasonic type 같은 경우 최대 사용 거리를 넘어가는 거리를 측정 할 경우 정도는 2배로 낮아지며, Pluse Radar type 같은 경우 Tank 내부 유체의 압력을 정전용량으로 변화시켜 그 신호를 전기 신호로 변화하여 사용하게 되는 데 Tank 내부의 액체 종류에 따라 전압력을 조정해주어야 하는 번거로움이 있다.

본 연구에서는 캔틸레버 끝에 Buoy를 연결 시켜 예상 할 수 있는 Tank 내부의 최소 높이 및 최대 높이를 광학 스펙트럼 분석기(OSA; Optical Spectrum Analyzer) 및 LabVIEW 프로그램을 사용하여 최적의 작업조건과, 최적의 성능을 갖는 구조를 찾아 낼 수 있었다.

광섬유 브래그 격자를 캔틸레버 와 Package 시켜 오동작 및 감도를 정확하게 얻게 만들었고 선박적용을 위한 광섬유 브래그 격자형 수위 모니터링 센서 시스템을 만들기 위한 목표로 연구를 진행해 왔다.

Abstract

In this research, Fiber Bragg Grating water monitoring sensor system was designed and its usefulness investigated. Fiber Bragg Grating is one of the many types from the field of optics.

The FBG water monitoring sensor system consists of 3 instruments and they are FBG, Cantilever and Buoy. The system is utilized by measuring the change of the refraction rate of the FBG. The wavelength of the FBG increases as the water inside the water tank increases and decreases if the water inside the water tank is decreased. All these can be picked up by the photo detector which displays the appropriate signal form by perceiving the changes of the electrical signal voltage.

Various kinds of ship tank level measuring equipment such as the existing ultrasonic type, electric pressure type have been developed. For cases similar to ultrasonic type, the exceeding distance that could be measured beyond the maximum distance is 2 times lower. As for cases similar to the Pulse Radar type, the fluid pressure inside the tank changes with the electrostatic capacity and that signal changes due to the electric signal. Although it is usable, the electrical pressure has to be adjusted according to the type of liquid inside the tank which makes it complex to use.

In this research, a Buoy is connected to the end of the Cantilever which enables the tank to estimate its minimum and maximum depth through the use of OSA and the LabVIEW program. In addition, the structural design that results in the optimum operating condition as well as the optimum performance could be found.

This research has been going on for the reason of developing FBG water level monitoring sensor system for shipping use in which the FBG through the use of the Cantilver and Package could correctly obtain errors as well as sensitivity



제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

선박에 사용되고 있는 여러 종류의 레벨측정 장비들은 반복적인 레벨측정과 접촉 또는 비접촉 방식에 의하여 점진적으로 손상이 누적되어 과도한 오류를 유발 할 수 있기 때문에 점진적이고 회복되지 않는 손상은 탱크 구조물의 안전성과 사용성의 문제점을 야기하게 된다. 이러한 이유로 많은 연구자들은 접촉식과 비접촉식에 대하여 많은 연구를 수행해 왔다.

접촉식 방식의 경우 탱크 속 물체와 직접적인 접촉 방식으로 사용 시간에 따라 기계적인 마모와 결합이 발생하게 된다. 기계적인 마모는 물체의 종류에 따라 바뀌게 되는데, 액체 같은 경우는 액체 온도와 액체량 그리고 특징에 따라 변하게 되고 기체 같은 경우는 압력과 온도에 따라 바뀌게 된다.

비접촉 방식 같은 경우는 측정할 수 있는 범위가 한정되어 있다. 측정하고자 하는 범위에서는 물체의량을 정확하게 측정할 수 있지만 범위를 벗어나게 되면 정확도 면에서 떨어지게 된다.

따라서 본 연구에서는 기존의 접촉 방식과 비 접촉방식의 시스템의 비용과, 기계적 단점을 보완하기 위해 광통신 및 광전자 기술의 발달로 탄생한 광섬유 센서를 이용하기로 했다. 일반적으로 사용되는 광통신용 광섬유의 직경은 250 μm 로서 대상구조물의 기능에 영향을 주지 않으면서 외부에 장착 또는 내부에 삽입이 가능하며 감지기와 구조물이 일체화된 구조물을 제작 할 수 있다. 측정할 수 있는 물리량도 변형률, 가속도, 초음파, 온도 부식등과 같이 매우 다양하여 기존 센서를 대체할 수 있을 뿐만 아니라 전기 저항 및 전자파에 영향을 받지 않는 특징도 있다. 신호획득 하드웨어 및 신호처리 기술의 발달로 변형률 실시간으로 취득하는 것이 가능해졌다. 따라서 광섬유 센서는 기존의 접촉식과 비접촉식의 단점을 보완할 수 있을 것이다[1][2].

또한 광섬유 센서를 사용하면 정확도는 높이면서 비용은 줄일 수 있는 것으로 예상된다. 본 연구에서는 수위 변화를 광섬유 브래그 격자를 이용한 수위 모니터링 시스템을 개발하여 실험을 평가·고찰하였다.

1.2 연구의 목적 및 내용

본 연구의 목적은 광섬유 브래그 격자를 이용하여 접촉 방식과 비접촉 방식에서 발생하는 문제점들을 줄임으로써 접촉 방식과 비접촉 방식에서 발생하는 노후화 또는 탱크 속 환경 변화에 대해서 비용 절감 및 수명을 늘리는 것이다.

이를 위하여 본 논문에서는 광섬유 브래그 격자 센서를 정의하고 광섬유 브래그 격자 센서의 동작을 평가한다. 그리고 광섬유 브래그 격자의 Package 방법을 제안하고 여기에 광섬유 브래그 격자 수위 레벨센서 시스템을 개발하여 그 결과를 광학 스펙트럼 분석기 및 LabVIEW 프로그램을 통해 비교·분석하였다.

광섬유 센서 시스템은 지능 재료(Intelligent Materials)와 스마트 구조 시스템(Smart Structure System)의 핵심센서로서 기술 선진국에서는 1980년대부터 토목, 건축 구조물로의 응용 계측 기술 분야에 활발하게 개발되어 왔으며, 산업 현장의 구조물에도 꾸준히 적용되어 연구가 진행 중에 있다.

캐나다 토론토 대학의 R. Measure 그룹의 의해 광섬유 센서의 스트레인(Strain) 측정이 최초로 시행되었고, Virginia Polytech 대학의 광섬유(Fiber Optic) 그룹에 의해 ODTR 센서로 스트레인을 측정하는 연구가 진행되었다[3].

구조물 계측용 Bragg Grating 센서의 개발이 United Technology의 광섬유센서 연구팀에 의해 이루어졌으며 센서의 구조물 적용에 대한 연구가 진행되고 있으며 United Technology에서 개발한 Bragg Grating 센서는 3M사로 기술이 이전되어 단순한 센서가 아닌 광 필터 등의 부품으로 사용 가능하도록 용도를 다양화하여 상품화가 이루어져 현재 대량 생산하여 판매 중에 있다[3].

국내에서는 실제 구조물에 유지 관리를 위한 시스템으로 적용하기 위한 기초 연구는 활발히 진행되고 있다. 최근에는 토목건설 현장에서나 연구용으로 광섬유의 활용도가 증가 되고 있는 실정이다. 국내에서 광섬유와 관련하여 연구를 수행하고 있는 연구기관으로는 한국건설기술연구원, 한국표준과학연구원 등이 연구를 수행하고 있다. 이외 국내 대학에서 부분적으로 연구를 수행하고 있다. 김진양(2007) 주행 중 인 차량의 동적하중 측정에 관한연구 하였으며, 김우진(2006) FBG(Fiber Bragg Grating) 온도 센서를 이용한 전력용 변압기 과열 감시 시스템 연구 수행 하였으며, 이세창 등(2006) 광섬유 센서를 이용한 선박 및 해양기자재의 안전진단 기술 및 김도형 등(2004) 광섬유 센서를 이용한 선박의 구조 안전성 모니터링 시스템의 개발 하였으며 김영재(2006) 광섬유 센서를 이용한 터널 지중 및 내공변위 자동계측에 관한 비교 연구를 수행하였다[4].

연구동향의 분석결과 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 교량 및 터널의 유지관리 시스템 또는 선박의 안전성 사용에 관한 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있으며 일부는 상품화되어 활용되고 있다.

아직 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 선박의 탱크 구조물 수위 레벨 관리를 위한 시스템으로 적용한 사례는 없으나 지속적인 연구를 통해서 향후 기존의 산업, 기반 시설의 안전 진단 및 선박 등에 빠르게 적용 될 것으로 예상하고 있다.

본 연구에서는 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템을 개발하고 수위 변화를 측정하는 실험을 수행하며 센서의 특성을 조사하였다.

또한 수위 변화 때 수위의 증가와 수위의 감소가 변형률에 미치는 영향을 조사하였다. 광섬유 브래그 격자의 광 신호를 처리하기 위해 광검출기(Photodetector)를 사용하여 구현하였고 그래픽 사용자 인터페이스(GUI; Graphical User Interface)타입의 LabVIEW 프로그램을 이용하여 실시간으로 데이터를 확인 및 저장 할 수 있는 프로그램을 작성 하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 FBG 센서에 대한 구조와 센서 종류

및 특징에 대해 나타내었고 3장에서는 본 논문에서 제안한 FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템 개발에 관한 FBG 특성 실험을 하였다. 4장에서는 FBG 센서의 수위 검출기 실험을 제안하였고 제 5장에서는 4장에서 제안된 실험을 바탕으로 FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템 개발 및 평가 할 수 있었고 제 6장에서는 결론을 맺었다.



제 2 장 FBG 센서

2.1 광섬유 구조와 센서 종류

유리섬유에 빛을 통과 시키는 최초의 시험이 1930년경에 독일에서 실시되었고, 1958년경에는 영국에서 광섬유의 원형을 고안되었다. 그 후 1964년에 레이저가 발명되고부터 유리섬유를 통하여 빛을 전송할 수 있는 가능성이 급진적으로 발달하게 되어 현재와 같은 광섬유가 실용화 되었다[2].

일반적인 광섬유(Fiber Optic)는 <그림 2-1>과 같이 코어보다 굴절률이 작은 클래딩(Fiber Cladding)과 코어(Fiber Core)로 이루어져 있다. 코어와 클래딩의 주성분은 유리로 구성되어 있으며 폴리머 코팅과 재킷(Jacket)은 외부 환경으로부터 코어와 클래딩 등을 보호하기 위하여 설치된다.

굴절률이 큰 매질에서 작은 매질로 빛이 입사할 때, 그 경계 면에서 빛이 100% 반사되는 현상이 빛의 전반사라 하고 이것은 광섬유 코어를 따라 빛이 전파된다. <그림 2-2>에서 보는 바와 같이 빛을 전달하는 매개체인 코어로 입사된 빛은 코어와 클래딩의 굴절률 차로 인해 빛의 전반사가 일어나며, 클래딩을 통해 빛이 새어 나가지 않고 코어를 통해서만 빛이 전달되게 되는 하는 것이다.

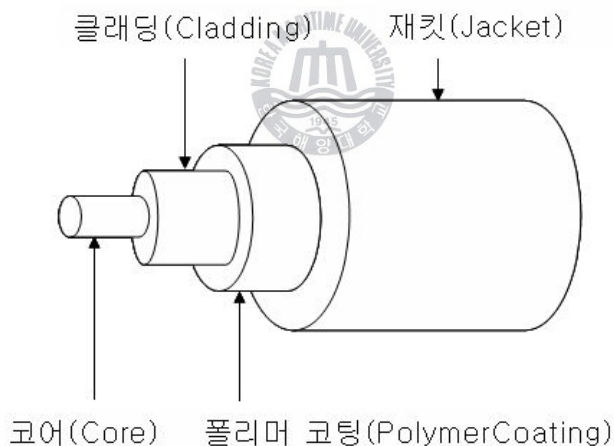
콘크리트 내부에 광섬유센서를 부착할 때 사용되는 폴리머 코팅은 유리섬유가 부식되는 수준인 수소 이온(Ph12) 정도의 알칼리 환경 하에서도 유리섬유를 보호하며, 광섬유 굽힘을 최소화 하도록 하여 쉽게 구부러지지 않도록 하는 역할을 한다. 그러나 폴리머 코팅의 낮은 탄성계수로 인하여 변형률 측정에 영향을 미칠 수 있으므로 변형률 측정 시 그 영향을 고려하여 보정해 주거나 최대한 얇게 처리하여 영향을 최소화 하도록 주의하여야 한다[5].

일반적으로 굴절률이 1.47인 코어와 1.46인 클래딩이 사용된다. <표 2-1>에는 광섬유의 구성 요소별 재료와 직경을 나타내었다.

<표 2-1> 광섬유 구조, 재료 및 직경

구분	재료	직경(μm)
코어(core)	SiO_2 , GeO_2	4, 9, 50
클래딩(cladding)	SiO_2	125
재킷(jacket)	폴리머, 아크릴레이트	250

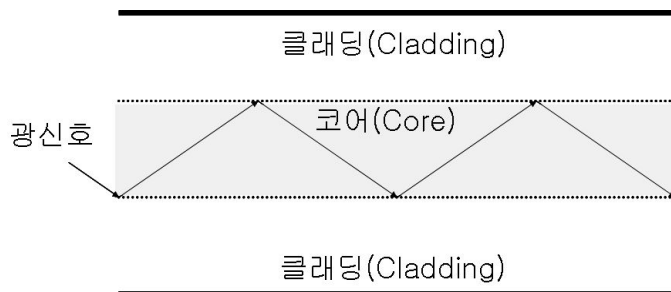
광섬유는 지름방향과 축 방향의 위상관계에서 특정한 전반사각을 가진 빛만이 전반(傳搬)이 가능한데, 이것은 모드(Mod)라고 한다. 섬유 내부를 전반 할 수 있는 모드의 수는 빛의 파장, 코어 지름, 코어와 클래딩의 굴절률차 등에 의하여 결정된다. 1개의 모드만을 전반 시킬 수 있는 섬유를 단일모드 광섬유라고 하고 다수의 모드를 전반 시킬 수 있는 섬유를 다중모드광섬유라고 한다.



<그림 2-1> 광섬유 구성 요소의 계략도

일반적으로 클래딩의 굴절률은 코어의 굴절률에 비하여 단일모드 광섬유의 경우는 0.1~0.2% 정도 큰 값을 갖고, 다중모드 광섬유의 경우는 1~2% 정도 낮은 값을 갖는다. 광섬유는 단일모드(Single Mode) 광섬유와 다중모드(Multi Mode) 광섬유로 분류된다. 다중모드 광섬유는 코어의 직경이 50~60 μm 로 단

일모드 광섬유에 비해 크고 근거리 통신용으로 사용되며 단일모드 광섬유는 코어의 직경이 $4\mu\text{m}$ 또는 $9\mu\text{m}$ 로 매우 작으며 전송 손실이 다중모드 광섬유보다 작기 때문에 장거리 통신이나 센서용으로 많이 사용된다.

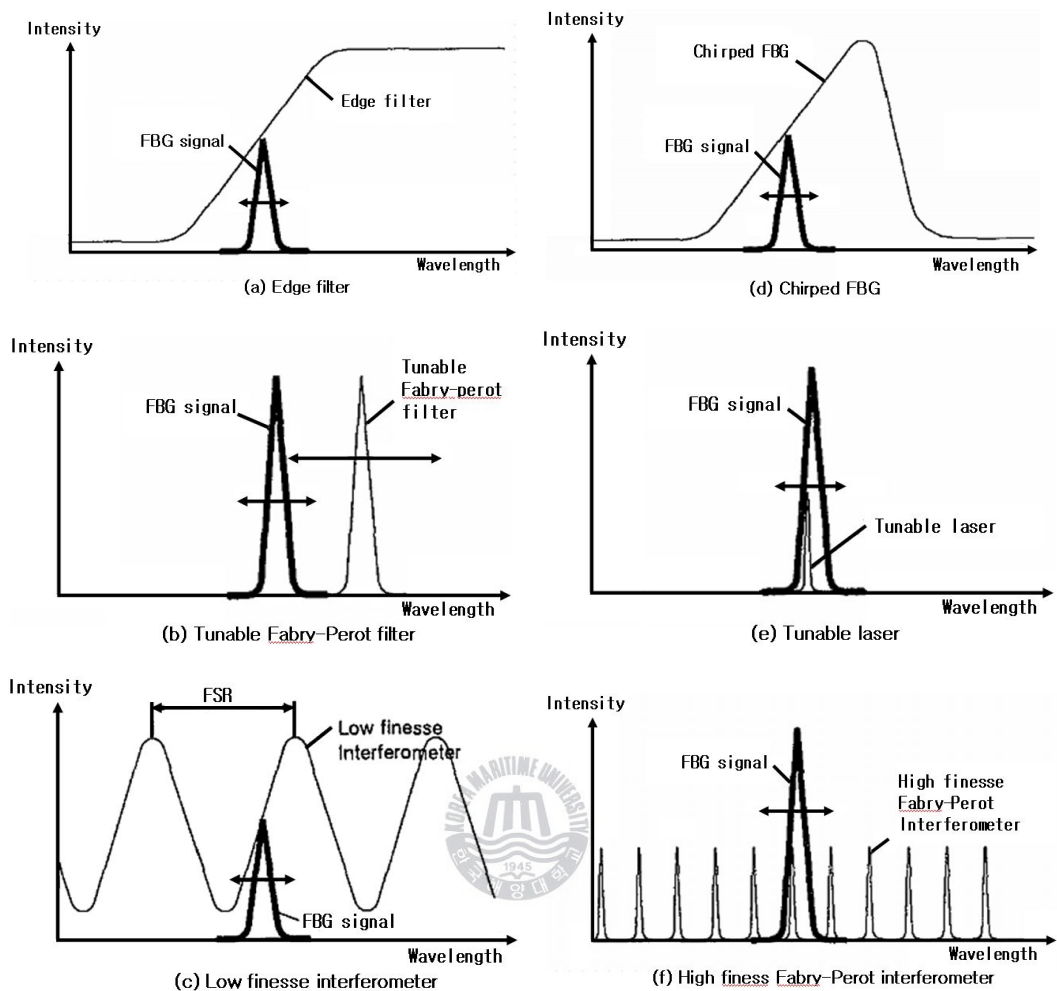


<그림 2-2> 전반사의 원리를 이용한 광섬유의 신호전달 원리

광섬유를 이용한 변형률 센서는 측정방식에 따라 브래그격자 광섬유센서 (FBG센서), 광강도센서(Intensity Sensor) 그리고 간섭형 센서(Interferometric Sensor)로 구분할 수 있다. 본 절에서는 여러 종류의 광섬유센서 중에서 연구가 활발히 진행되고 있는 FBG 센서에 대하여 기술 하였다[6].

2.2 광섬유 센서 복조기술

광섬유 복조기술은 <그림 2-3>과 같다 브래그 반사파장은 광학 스펙트럼 분석기나 파장 계측기(Wavelength Multimeter)를 사용하면 쉽게 반사파장 측정을 할 수 있으나 실시간으로 측정하기에는 부적합하다. 이에 브래그 반사파장을 빠르고 정확하게 계측하기 위해 여러 가지 복조기술이 개발되어 왔다. 이러한 복조 기술은 FBG 센서의 브래그 반사파장을 직접 계측하는 방법과 브래그 파장의 변이를 광량 변화로 변환하여 간접적으로 계측하는 방법인 광세기 복조(Intensity Demodulation)로 나눌 수 있다.



<그림 2-3> 광섬유 복조 방식

브래그 파장을 직접 계측하는 방법의 가변 패브리-페로 필터를 사용한 복조기는 <그림 2-3> (b) 와 같이 브래그 반사파장을 직접 계측할 수 있으며, 현재 개발되어 있는 FBG 센서 복조기 중에서 해상도 및 신뢰도가 높아 많이 쓰이고 있으나 가격이 비싸고 압전 작동기의 파장 주사속도의 한계로 인하여 200Hz 정도의 측정 속도를 가지고 있으며 1kHz이상의 동적 변형률은 측정할 수 없다는 단점이 있다[2].

광세기 복조(Intensity Demodulation) 방법은 브래그 반사 파장의 이동을 광

세기의 변화량으로 변환시킬 수 있기 때문에 측정 속도는 광 검출기의 주파수 대역까지 높일 수 있으므로 매우 빠르다는 장점이 있으며 마흐-젠더 간섭계나 EFPI 간섭계(Low-Finesse Interferometer <그림 2-3> (c) 참조), Chirped FBG(<그림 2-3> (d) 참조)와 Tunable Laser (<그림 2-3> (e) 참조)를 이용한 복조방법이 광 세기복조방법에 속하며 가변 패브리-페로 필터 방식의 복조 방법 보다 민감도와 주파수 대역 및 측정 속도가 우수하다.

광세기 복조가 브래그 파장을 직접 계측하는 복조기 보다 민감도 및 주파수 대역이 우수하나 상대적으로 측정 영역이 좁다. 또한 광세기 복조기 중에서 가변 파장 레이저 복조기가 광대역 광원을 사용하는 간섭계 복조기나 Chirped Fiber 복조기 보다 우수한 민감도를 보이고 있으나, 측정할 수 있는 영역은 FBG 센서의 반사 스펙트럼 영역에 한정되므로 측정영역이 작다[2].

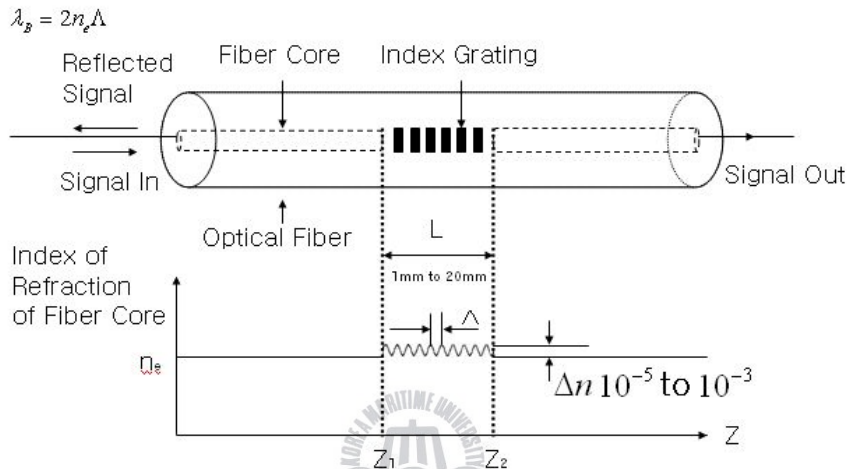
2.3 FBG

광섬유 FBG 센서는 광섬유 코어에 주기적인 굴절률 변조를 주어 특정 파장을 반사시키는데, 삽입 손실이 작고 파장 선택도가 높은 특성을 보이므로 광섬유 센서 기술 중에서 전망이 밝고 최근 들어 각광을 받으면서 많은 연구가 진행되어지고 있는 센서 기술이다.

FBG 센서는 측정된 스트레인 정보가 광의 위상차 대신에 파장으로 측정되기 때문에 변형의 절대량의 측정이 가능하다. 그리고 FBG 센서는 광섬유 한 가닥에 다중점 계측이 가능한 센서로서 측정의 확장이 용이하다. FBG 센서는 현재 선박의 안전 모니터링 시스템 및 선박의 스트레인 변형에 의한 감시 시스템(Vessel Health Monitoring System) 등에서 일부 적용 및 연구 진행과 함께 적용 범위가 점차 늘어날 것으로 기대 된다.

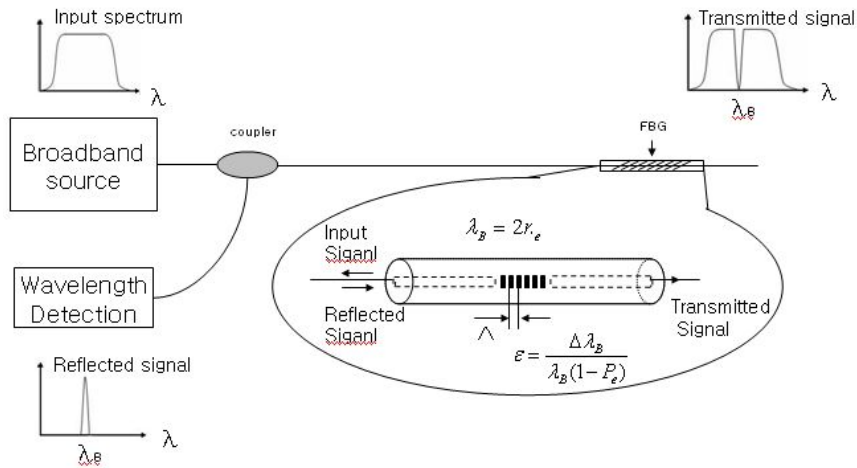
FBG는 코어에 게르마늄과 같은 불순물을 첨가한 후 자외선 레이저를 조사하여 주기적으로 굴절률을 변화시킴으로써 격자를 새긴 것을 말한다. 주기적으

로 변조된 굴절률의 경계면에서는 미량의 빛이 반사되게 되는데, FBG는 광섬유 코어에 새겨진 수 만개의 격자에서 일어나는 다중반사와 간섭현상에 의해서 일정한 파장범위를 반사시키는 소자이다. 격자의 주기와 유효굴절률에 의해 브래그 파장이라 불리는 특정 파장이 반사하게 되고, 반사되는 파장이 온도와 스트레인의 변화에 거의 선형적으로 변한다는 특징을 갖고 있다.



<그림 2-4> 광섬유 브래그 격자의 구조 및 동작 특성

광섬유의 측면에 248nm 근방 파장의 자외선 레이저를 이용하여 간섭무늬를 형성하면 광섬유 코어의 굴절률은 간섭무늬에 에너지 분포에 따라 주기적으로 변화하며 이러한 광섬유 브래그 격자는 <그림 2-4> 와 같은 구조 및 동작 특성을 가진다. 빛이 진행하는 광섬유 코어 내에 주기적인 굴절률의 변화가 새겨진 것은 브래그 격자의 역할을 하게 되며 <그림 2-5> 과 같이 광폭 스펙트럼을 광섬유에 입사 시킬 경우 굴절률이 변하는 경계면에서 빛이 반사하는데 다음의 식 (2.1)과 같은 브래그 조건에 의해서 결정된 파장 성분은 보강 간섭을 일으켜 광섬유 격자 부위에서 반사되며 나머지 파장 성분은 통과하게 된다 [2][6].



<그림 2-5> 광섬유 브래그 격자 센서의 중심파장 부호화 방법

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (2.1)$$

여기서 λ_B : 반사 측정되는 Bragg 파장

n : 광섬유의 굴절률

Λ : 제작된 격자 간격

위의 브래그 조건에서 보듯이 격자에서 반사되는 브래그 파장은 유효 굴절률과 격자 간격의 함수이다. 그리고 유효 굴절률과 격자의 주기는 온도와 변형률의 함수이므로 광섬유 브래그 격자에 온도나 변형 등의 외란이 가해지면 이들 값이 변하여 브래그 파장은 달라진다. 브래그 조건에서 브래그 파장을 전미분을 취한 후 온도, 변형률과 유효 굴절률, 격자 간격의 식을 대입하면 식 (2.2)를 얻을 수 있다. 변화된 브래그 파장을 정밀하게 측정한다면 광섬유 격자에 가해진 온도나 스트레인을 식 (2.2)에 의해 계산할 수 있으며, 이것이 광섬유 브래그 격자가 센서로 사용될 수 있는 기본 원리이다[2][6].

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B[(1 - P_e)\Delta\epsilon + (\alpha + \xi)\Delta T] \quad (2.2)$$

여기에서 P_e 는 광탄성 상수(photoelastic constant)이며 다음과 같이 표현 된다.

$$P_e = \left(\frac{n^2}{2}\right)P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12}) \quad (2.3)$$

식 (2.2)에서

α : 광섬유의 온도에 따른 팽창계수로 실리카의 경우 $0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

ξ : 온도에 의한 광섬유의 굴절률 변화를 나타내는 열광학계수

(Thermal-Optic Coefficient)로서 약 $8.30 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$

P_e : 광탄성 상수(photo-elastic constant)로 게르마늄 실리카 유리

(Germano Silicate Glass)의 경우 대략 0.22의 값을 가짐

※ 광섬유에 따라 다른 값을 가질 수 있으므로 정확한 변형률
의 측정을 위해서는 s의 값의 측정이 요구 된다.

$\Delta \varepsilon$: 광섬유 격자에 가해진 변형률 변화량

ΔT : 광섬유 격자에 가해진 온도 변화량

식 (2.3)에서는

P_{11} 과 P_{12} : 스트레인 광학 텐서(strain-optic constant)의 성분

n : 코의 굴절률

ν : 광섬유의 포아송 비

식 (2.2)에서 파장의 변이는 온도의 변화에 의한 것과 변형률의 변화에 의한 것을 모두 포함하고 있는데, 광섬유로 측정 가능한 범위 내에서는 대체로 선형적이다. 본 연구에서와 같이 센서들 간의 온도 차이가 없는 상태에 국한시켜 구조물의 변형을 측정한다면 식(2.2)에서 $\Delta T=0$ 으로 둘 수 있고 다음의 식 (2.4)과 같이 간단하게 변형률과 파장의 관계식을 얻을 수 있다[2][6].

$$\Delta\epsilon = \frac{1}{(1-P_e)} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (2.4)$$

그러므로 변형률은 브래그 반사파장의 변화량만으로 측정하면 쉽게 구할 수 있다. 또한 광섬유 브래그 격자의 중심 파장을 서로 다르게 하여 변형을 받을 때도 그 중심 파장이 중첩이 안 되도록 서로 다르게 설정하면 하나의 광섬유 라인에 여러 개의 브래그 격자 센서를 배열할 수 있다. 그러므로 동시에 여러 지점에서 각기 개별 센서의 신호를 분리해내어 측정할 수 있어서 멀티 플렉싱이 가능하다.

광섬유 브래그 격자의 제작 방법에는 Hill에 의해 개발된 방법과 홀로 그래픽 방법, 위상 마스크에 의한 방법이 있다.

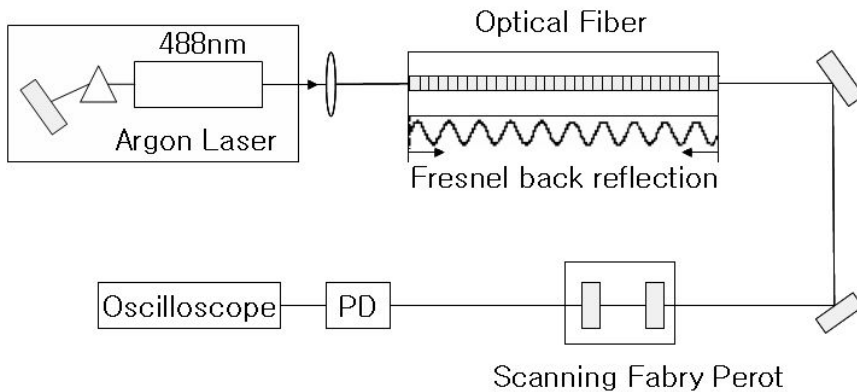
1) Hill 광섬유 브래그 격자(Internally Written Grating)



1978년, Hill은 488nm 파장의 단일모드 Ar+(아르곤) 레이저를 Ge 가 첨가된 광섬유 코어 내에 입사시켰을 때 브래그 격자가 광섬유 내에 형성됨을 최초로 관측하였다.

이러한 현상은 광섬유 끝단에서의 반사(Fresnel Reflection)에 의한 빛과 입사된 빛이 정상파(Standing Wave)를 형성하고, 형성된 정상파의 주기적인 에너지 변화가 광섬유 코어 내에 주기적인 굴절률의 변화를 유도했기 때문이었다.

실제 제작 과정은 488nm 파장의 아르곤 레이저로 광섬유 코어 내에 정상파를 형성시켜 광섬유의 길이 방향으로 광유도 격자를 형성시켰다. 하지만 이 방법은 정상파의 마루의 간격이 빛의 파장에 의해 결정되므로 빛의 파장에 따라 하나의 브래그 파장을 갖는 격자만이 생성되는 단점이 있다.



<그림 2-6> Ar⁺ 레이저에 의해 발생한 정상파로 형성된 광섬유 브래그 격자

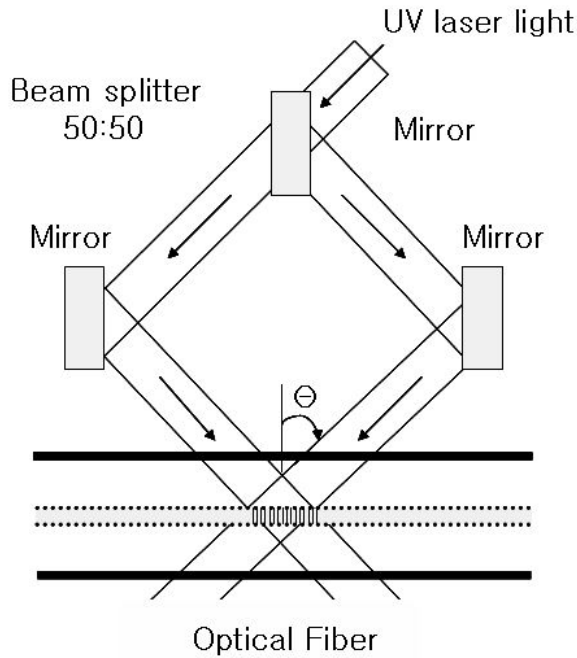
2) 홀로그래픽 방법 (Holographic Method)

1989년 Meltz 등에 의해 개발된 홀로 그래픽 방법은 강한 자외선 레이저 광원으로 광섬유의 옆면에 간섭무늬를 형성시켜 광섬유 코어에 굴절을 변조를 일으킴으로써 위상 격자를 형성 시키는 방법이다.

홀로 그래픽 방법을 통해 광섬유 격자를 형성시키는 방법은 이전의 정상파를 사용하여 내부적으로 광섬유 격자를 형성시키는 방법에 비해 여러 가지 장점을 지니고 있다. 가장 큰 장점은 기존의 방법이 고정된 브래그 파장만을 제작할 수 있었던 것에 비해, 홀로 그래픽 방법은 격자를 형성시키는 두 빛의 각도를 조절하거나 사용되는 빛의 파장을 변화시켜 광섬유 격자의 브래그 파장을 선택할 수 있다[3].

또한 홀로그래픽 방법은 보강간섭에 의한 간섭무늬의 빛의 세기가 매우 강하기 때문에 굴절을 변화를 더 크게 일으켜 격자의 길이를 짧게 할 수 있었다.

하지만 간섭을 일으키는 두 광원의 경로상의 작은 변화에도 큰 영향을 받기 때문에 높은 안정성이 요구되고, 또한 공간 간섭성(Spatial Coherence)이 큰 레이저를 사용해야 한다는 단점이 있다.



<그림 2-7> 홀로그래픽 방법에 의한 광섬유 격자 형성

중심 파장이 λ_B 인 광섬유 격자를 형성하기 위한 두 UV 빛 사이의 각도 Θ 는 식 (2.7)과 같다.

$$\Theta = \sin^{-1} \left[n \sin \left(2 \sin^{-1} \left(\frac{\lambda_{uv}}{\lambda_B} \right) \right) \right] \quad (2.7)$$

(n : 파이버 코어의 유효 굴절률, λ_{uv} : 사용된 중심파장)

3) 위상 마스크 이용법

이러한 단점을 극복하기 위해 Hill은 위상 마스크에 의한 광섬유 브래그 격자 제작 방법을 제안하였다. 위상 마스크는 일종의 회절 광학소자로서 격자 형성에 자외선 빛을 통과시켜 공간에 따른 위상차를 유도하여 자외선 빛의 간섭무늬를 광섬유 코어 내에 형성 시키도록 한 간섭형 마스크이며 이를 이용하면 비

교적 쉽게 광섬유 브래그 격자를 제작할 수 있다. 이 때 사용하는 위상 마스크는 <그림 2-8>과 같이 위상 마스크를 투과한 후 직진하는 성분인 0차 회절광이 위상 마스크의 골과 마루 사이에 π 의 위상차를 가져 상쇄 간섭되어 없어지고, +1 차, -1 차 회절이 많아 이 두 회절 빛이 서로 보강 간섭을 일으켜 광섬유에 간섭무늬를 형성 시킬 수 있게 된다.

위상 마스크는 <그림 2-8>과 같이 마스크의 골의 깊이(DPM) 를 조절함으로써 위상 마스크에 수직으로 인가된 UV 빛의 0차 회절은 수 % 이내로 하고, 1차 회절을 최대로 하여 이 빛들을 이용하여 광섬유 코어에서 간섭을 일으킨다.

따라서 0차 회절된 빛은 위상 마스크의 골과 마루 사이만큼의 위상차를 가져야 한다.

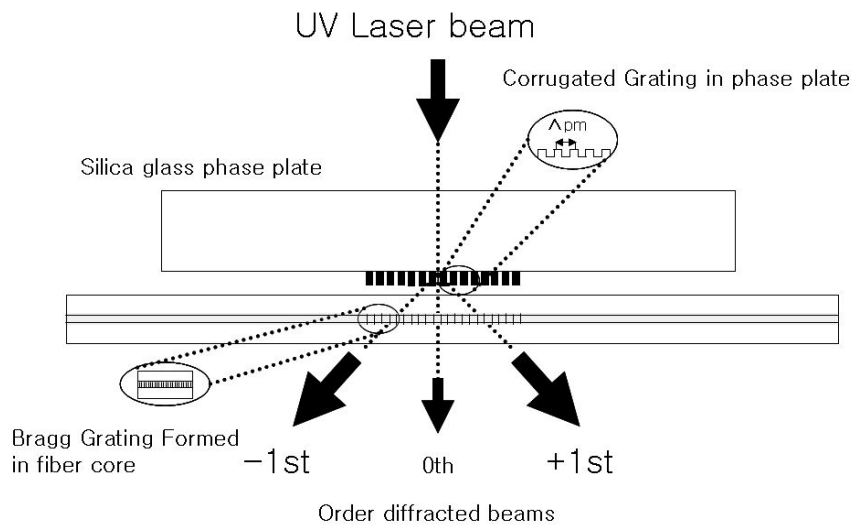
$$\frac{2\pi(n_{uv}-1)D_{PM}}{\lambda} = \pi \quad (2.8)$$

여기서, n_{UV} 는 입사되는 UV 빛에 대한 위상 마스크의 굴절률, λ 는 UV 빛의 파장을 나타낸다. 위상 마스크를 이용하여 광섬유 격자를 제작한 경우의 브래그 파장과 위상 마스크의 골 간격 사이의 관계는 식 (2.9), 식 (2.10)과 같다.

$$\Lambda_{PM} = 2 \times \Lambda_{grating} \quad (2.9)$$

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda_{grating} = n_{eff}\Lambda_{grating} \quad (2.10)$$

홀로 그래픽 방법과 비교할 때 위상 마스크를 사용하는 방법은 격자 형성용 자외선 빛의 간섭성 길이에 관계없이 광섬유 격자를 만들 수 있으므로 저가의 자외선 레이저를 사용할 수 있고, 단순히 하나의 광학 소자를 사용하므로 시스템이 훨씬 간단해지며, 보다 안정적으로 광섬유 격자를 만들 수 있기 때문에 광섬유 격자를 대량으로 제작할 수 있다는 장점이 있다[3].



<그림 2-8> 위상 마스크에 의한 광섬유 격자의 형성



제 3 장 FBG 센서의 온도 변화 및 변형률 측정 실험

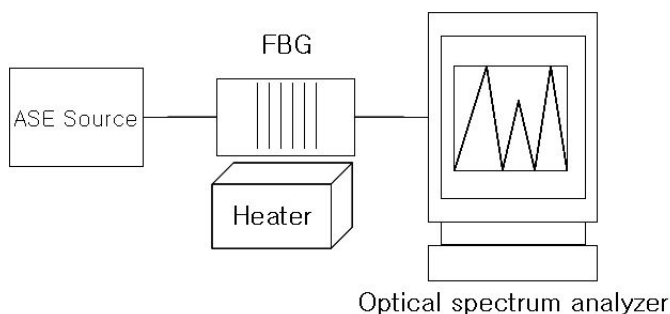
3.1 실험 개요

본 장에서는 FBG 센서의 수위 검출기 실험을 수행하기 이전에 FBG 센서의 특징인 변형률 및 온도 변화에 대해 측정해 보고자 한다.

FBG 센서의 변형률 측정에서는 캔틸레버와 변위 변화를 주는 실험이고 FBG 센서의 온도 변화에 따른 실험에서는 FBG 센서에 일정한 온도를 변화 시켜 주므로써 FBG 센서의 특징을 확인 해볼 것이다.

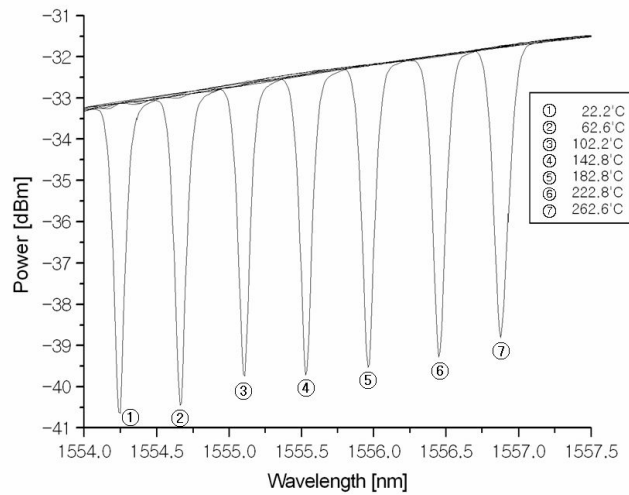
3.2 FBG 온도 변화 측정 실험

FBG 센서의 성능을 평가하기 위해 센서의 온도 변화에 대한 실험을 실시하였다. FBG 센서의 온도를 측정하기 위해서는 일정한 온도가 우선시 되어야 한다. 이는 주변의 환경 또는 여러 다른 원인으로 광 세기의 변화가 발생하기 때문이다[7-9].

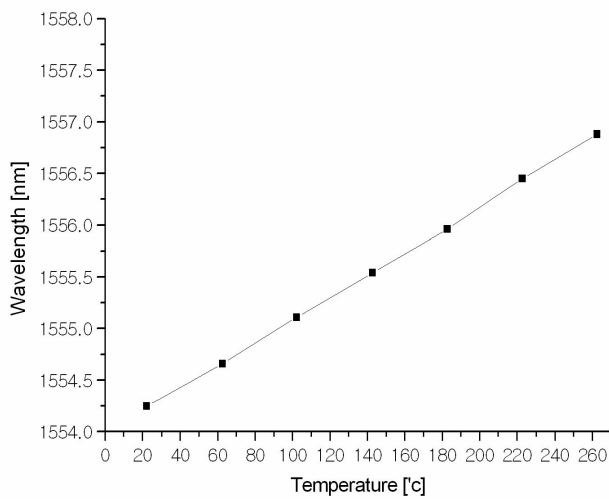


<그림 3-1> FBG 센서의 온도 변화를 위한 실험 장치

FBG 센서의 온도 변화를 위한 실험 장치는 <그림 3-1>과 같다.



<그림 3-2> FBG 센서의 온도 변화에 따른 중심 파장과 광세기 관계 스펙트럼



<그림 3-3> FBG 센서의 온도 변화에 따른 중심 파장 분석

일정한 온도로 변형을 가하기 위해 Heater에 40℃로 설정하였으며, <그림 3-2>은 FBG 센서의 온도 변화에 따른 중심 파장과 광세기 관계 스펙트럼을 나타내고, <그림 3-3>은 FBG 센서의 온도 변화에 따른 중심 파장 변화를 분석한 것이다.

<표 3-1>에서 보듯이 온도 변화에 따라 반사된 파장 즉 중심파장의 변화와 변형률 변화를 알 수 있다.

<표 3-1> FBG 센서 온도 변화에 따른 중심파장 과 변형률

온도 [℃]	22.2	62.6	102.2	142.8	182.8	222.8	262.6
$\lambda_B(\text{nm})$	1554.25	1554.66	1555.11	1555.54	1555.96	1556.45	1556.88
변형률($\mu\epsilon$)	0	338	709	1064	1411	1815	2169

이 실험에서 0℃~240℃ 사이에 40℃ 온도 변형을 주었기 때문에 이는 식 (3.2) 및 식 (2.2)에 따라 370 $\mu\epsilon$ 의 변형을 준 것이라고 볼 수 있다. 따라서 FBG 센서에 370 $\mu\epsilon$ 의 변형이 생겼을 때 40℃에 해당하는 온도 변화가 생긴 것이다.

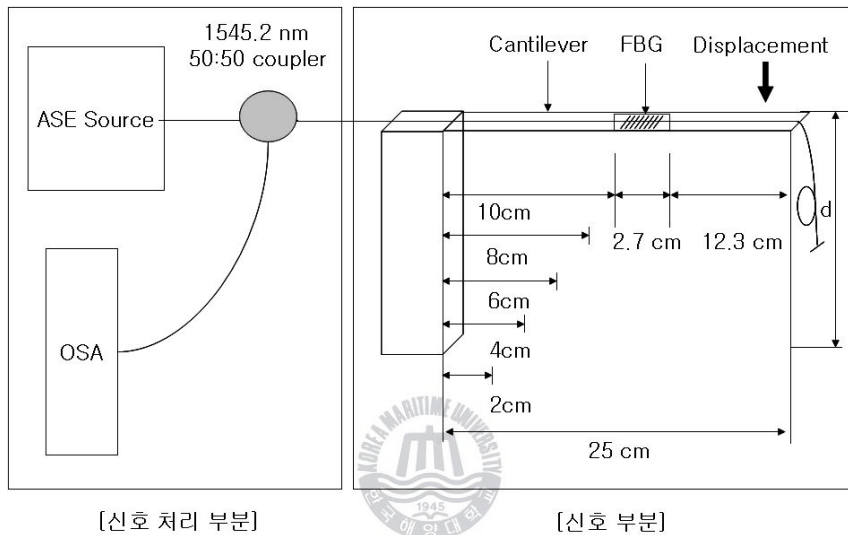
3.3 FBG 센서 변형률 측정 실험

FBG 센서의 변위 변화에 따른 변형률 측정 시스템을 구축하기 위해서는 변위의 무게 측정이 우선시 되어야 한다. 이는 광세기 복조를 하는 시스템의 대부분에서와 같이 FBG 센서에 변형이 생기지 않았음에도 광원의 불안정성(Fluctuation)이나 여러 다른 원인으로 인한 광 세기의 변화가 생기기 때문이다.

1) 고정점의 위치와 캔틸레버 변위에 대한 FBG 센서 변화에 대한

특성 실험

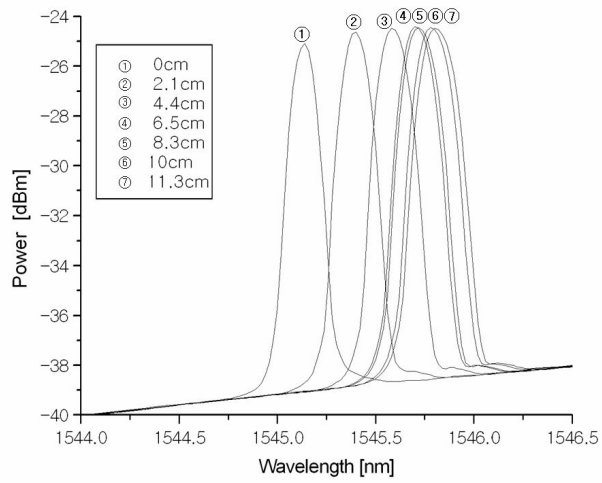
FBG 센서의 변위 변화에 따른 변형률 측정 시스템의 구성은 <그림 3-4>과 같다. FBG 센서에 변형이 생겼을 때 그 중심 파장의 변화는 변위가 변화면서 광 세기가 변하게 된다. 이 때 광 세기의 변화로 FBG 센서에 가해진 변형률을 측정 할 수가 있다.



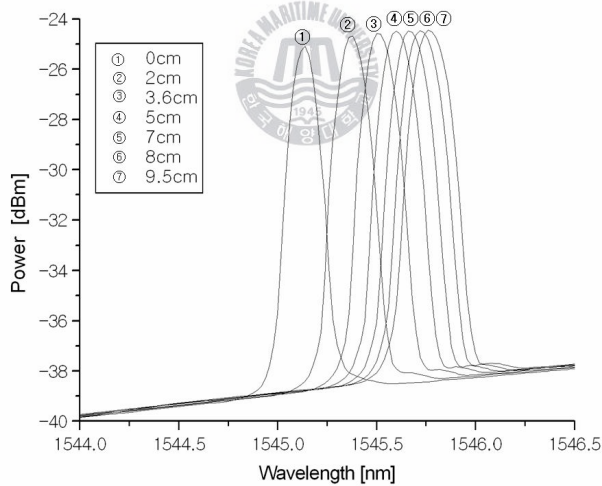
<그림 3-4> FBG 센서의 변위 변화에 따른 변형률 측정 시스템

FBG 센서의 반사파장을 2×1 커플러로 분기하여 하나는 ASE Source (Amplified Spontaneous Emission Source)로 다른 하나는 광학 스펙트럼 분석기 통해 반사 파장의 신호를 그대로 취득하였다. 이는 광섬유 라인의 벤딩이나 온도 변화와 같은 외부의 환경 변화에 따라 통과 시킬 수 있는 광량이 달라지기 때문에 FBG 센서의 변형에 따른 광 세기의 변화가 항상 일정하지가 않기 때문이다.

이와 같이 신호를 분기해서 받아 정규화 시키면 외부 환경 변화에 의해 광세기 변화의 절대량은 변할지라도 FBG센서의 변형에 의한 광 세기의 변화는 일정하게 된다[10][11].

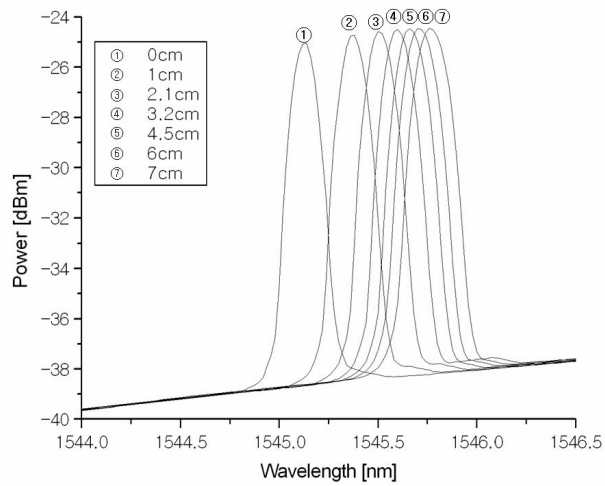


a. 10cm

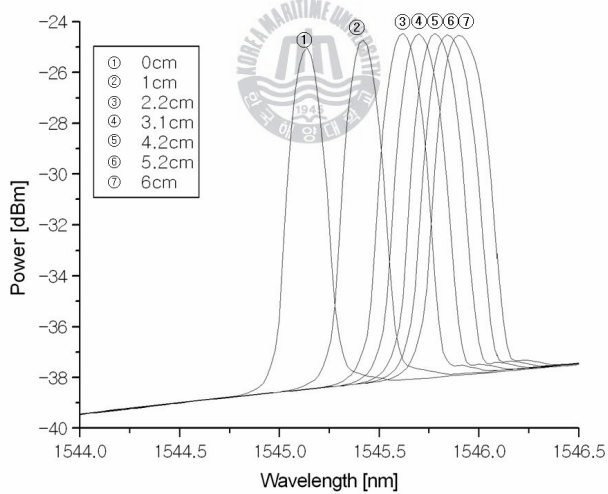


b. 8cm

<그림 3-5> 고정점의 위치와 캔틸레버 변위에 대한 FBG센서
중심파장 이동을 보여주는 스펙트럼 (계속)

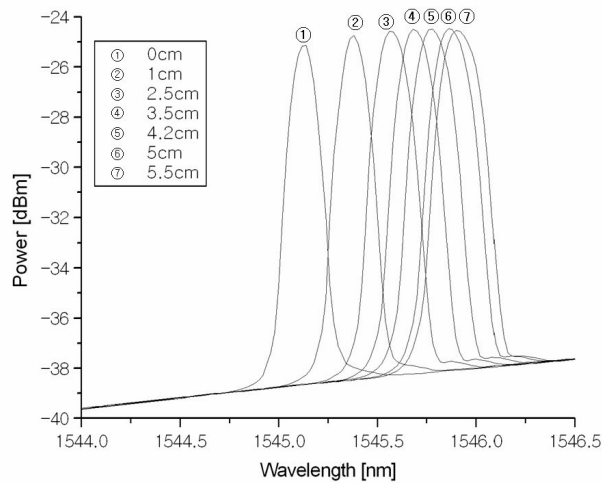


c. 6cm



d. 4cm

<그림 3-5> 고정점의 위치와 캔틸레버 변위에 대한 FBG센서
중심파장 이동을 보여주는 스펙트럼 (계속)



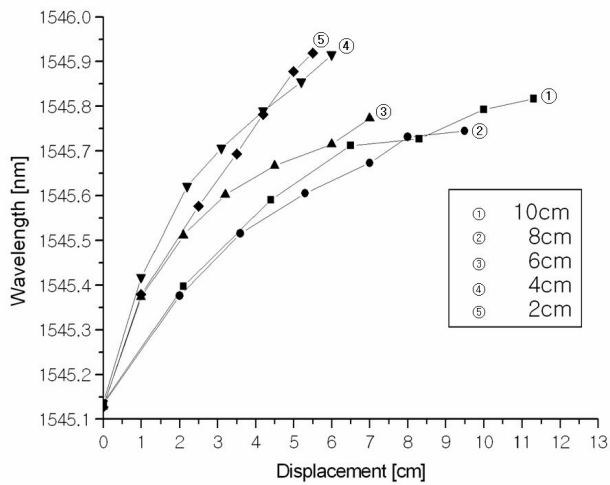
e. 2cm

<그림 3-5> 고정점의 위치와 캔틸레버 변위에 대한 FBG센서
중심파장 이동을 보여주는 스펙트럼

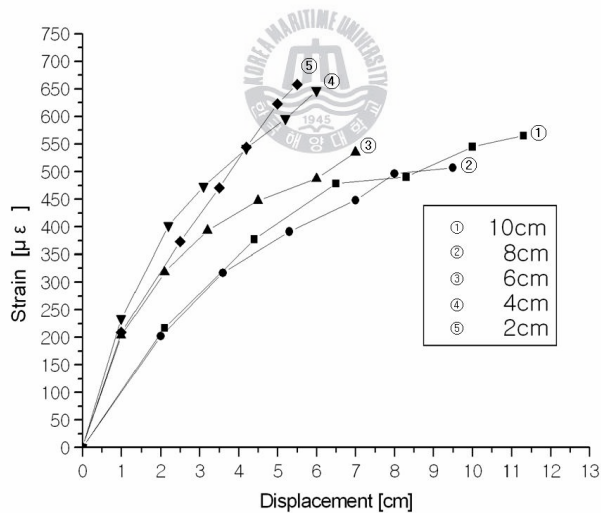
1545.2nm의 중심파장을 갖는 FBG 센서의 한 쪽 끝을 고정시키고 다른 쪽 끝을 광학 스펙트럼 분석기로 관찰하면서 변위를 가한다. <그림 3-5>은 1545.2nm의 중심 파장을 가진 FBG 센서에 54.2g의 변위를 인가 및 고정점의 위치와 FBG 사이의 거리 변화에 따른 반사 파장 스펙트럼으로 나타낸다.

그림 <그림 3-6> 같은 경우 1545.2nm의 중심 파장을 가진 FBG 센서에 54.2g의 변위를 인가 및 고정점의 위치와 FBG 사이의 거리 변화에 따른 반사 파장 스펙트럼의 중심파장 이동과, 변형률 분석을 나타낸다.

이와 같이 FBG 센서에 325.2g의 변위 및 고정점 위치와 FBG 사이의 거리 변화를 주었을 때 광세기의 변화를 알아보고 중심 파장과 변형률 관계를 알 수 있다.



a. 변위에 따른 중심파장



b. 변위에 따른 변형률

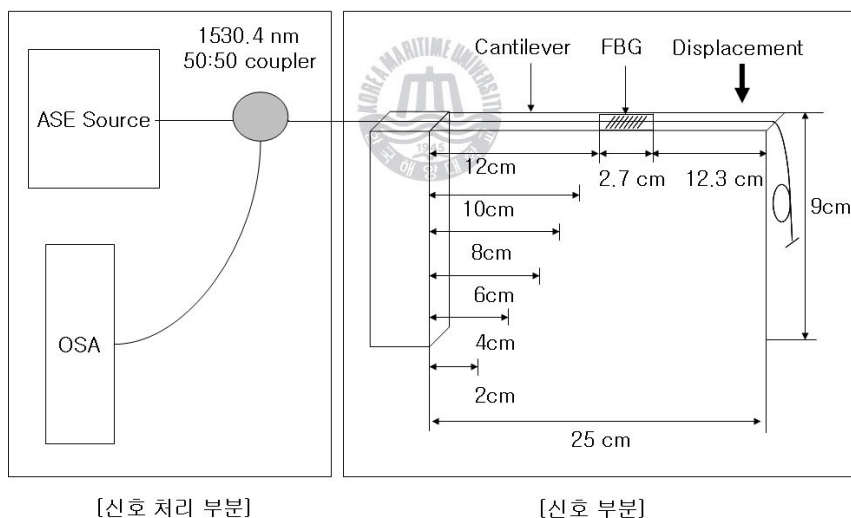
<그림 3-6> 고정점의 위치와 캔틸레버의 변위 변화에 따른 FBG 센서의 중심 파장 이동과 변형률 관계 분석

2) FBG 이동 변위에 대한 FBG 센서 중심파장 이동을 보여주는 특성 실험

FBG 센서의 변위 변화에 따른 변형률 측정 시스템의 구성은 <그림 3-7>과 같다. FBG 센서에 변형이 생겼을 때 그 중심 파장의 변화는 변위가 변화면서 광 세기가 변하게 된다. 이 때 광 세기의 변화로 FBG 센서에 가해진 변형률을 측정 할 수가 있다.

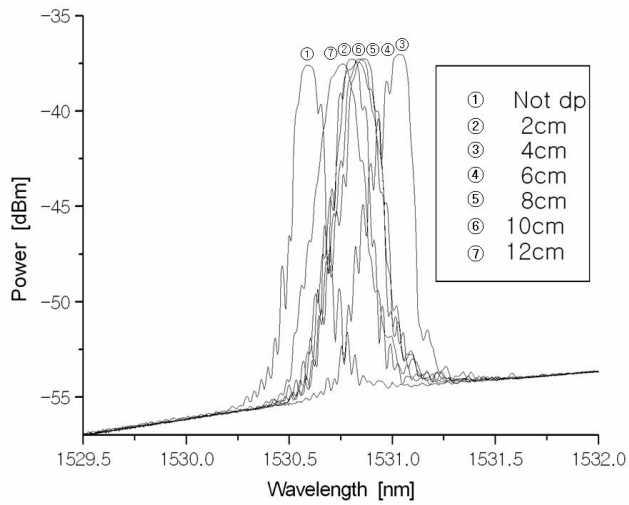
FBG 센서의 반사파장을 2×1 커플러로 분기하여 하나는 ASE Source로 다른 하나는 광학 스펙트럼 분석기 통해 반사 파장의 신호를 그대로 취득하였다.

1530.4nm의 중심파장을 갖는 FBG 센서의 한 쪽 끝을 고정시키고 다른 쪽 끝을 광학 스펙트럼 분석기로 관찰하면서 변위를 인가한다.

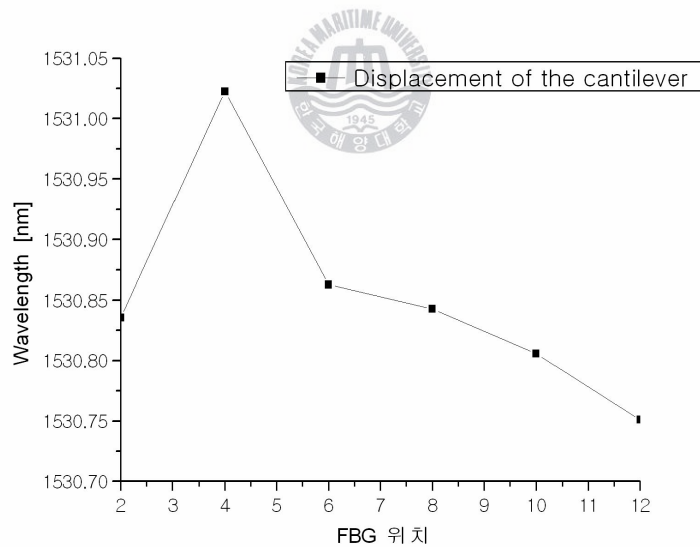


<그림 3-7> FBG 센서 이동 변위 변화에 따른 변형률 측정 시스템

<그림 3-8>은 1530.4nm의 중심 파장을 가진 FBG 센서에 일정한 9cm의 변위를 인가 및 캔틸레버의 길이는 고정 시키고 FBG 센서의 위치 변화에 따른 반사 파장 스펙트럼으로 나타낸다.

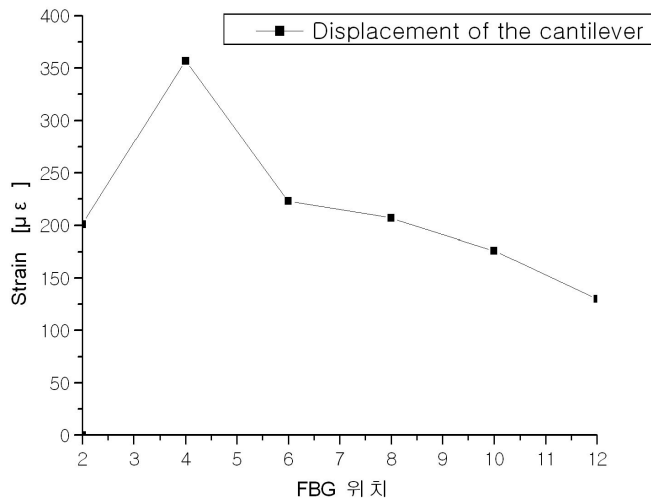


<그림 3-8> FBG 센서 이동 변위 변화에 대한 FBG센서 중심파장 이동을 보여주는 스펙트럼



a. FBG 센서 이동 변위에 따른 중심파장

<그림 3-9> FBG 센서의 변위 변화에 따른 중심파장 이동과 변형률 관계 분석 (계속)



b. FBG 센서 이동 변위에 따른 변형률

<그림 3-9> FBG 센서의 변위 변화에 따른 중심파장 이동과 변형률
관계 분석

그림 <그림 3-9> 같은 경우 1530.4nm의 중심 파장을 가진 FBG 센서에 9cm의 변위를 인가 및 고정 시키고 FBG 센서의 위치 변화에 따른 반사 파장 스펙트럼의 중심파장 이동과, 변형률 분석을 나타낸다.

3) 고정점의 위치와 외팔보 변위에 대한 FBG 센서 변화에 대한 특성 실험 결과 및 고찰

먼저 고정점의 위치와 캔틸레버의 FBG센서 사이의 거리 변화가 1cm 및 변위가 있을 때 FBG 센서의 반사 파장의 빛의 광세기는 -24.668dB로 측정되었고 그 때 중심파장은 1545.8169nm로 측정되었다. 또한 고정점의 위치와 캔틸레버의 FBG 센서 사이의 거리 변화에 광세기 및 중심파장 변화를 알 수 있었다.

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{(1-P_e)} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (3.1)$$

일반적으로 온도가 일정하다고 가정하였을 때 식 (3.1)과 같이 변형률과 파장과의 관계식은 널리 알려져 있다. 광탄성 계수 P_e 를 0.22라고 가정하다면 이 실험에서 1545.2nm 에 325.2g의 변형을 주었기 때문에 이는 식 (3.1)에 따라 $565\mu\varepsilon$ 의 변형을 준 것이라고 볼 수 있다.

2) FBG 이동 변위에 대한 FBG 센서 중심파장 이동을 보여주는 특성 실험 및 고찰

먼저 고정점의 위치와 캔틸레버에 부착된 FBG센서 사이의 거리 변화가 2cm 및 변위가 있을 때 FBG 센서의 반사 파장 빛의 광세기는 -37.648dB로 측정되었고 그 때 중심파장은 1530.8356nm로 측정되었다. 또한 고정점의 위치와 캔틸레버의 FBG 센서 사이의 거리 변화에 광세기 및 중심파장 변화를 알 수 있었다.

일반적으로 온도가 일정하다고 가정하였을 때 식 (3.1)과 같이 변형률과 파장과의 관계식은 널리 알려져 있다. 광탄성 계수 P_e 를 0.22라고 가정하다면 이 실험에서 1530.42nm 에 12cm의 변위를 주었기 때문에 이는 식 (3.1)에 따라 $130\mu\varepsilon$ 의 변형을 준 것이라고 볼 수 있다.

제 4 장 FBG 센서의 수위 검출기 실험

4.1 실험 개요 및 방법

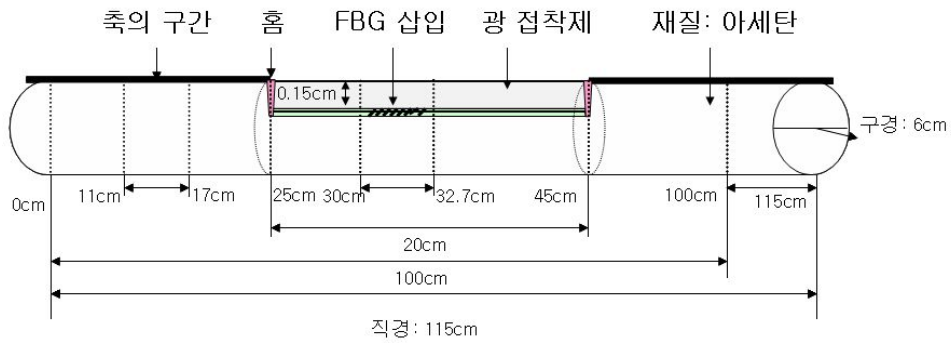
FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템 개발을 하기 위해 캔틸레버 위, 아래, 옆 부분에 센서 패키지 및 수위 변화에 따른 변형률, 감도 특성을 구하기 위한 실험을 실시하였다.

본 연구에서는 FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템 개발을 위해 FBG 센서가 Package 된 캔틸레버 및 FBG 센서 수위 검출기 모형을 제작하였다. FBG 센서 수위 검출기 모형 과정은 다음과 같다. 먼저 3개의 캔틸레버의 각 위, 아래, 옆 부분에 FBG 센서를 Package 한다.

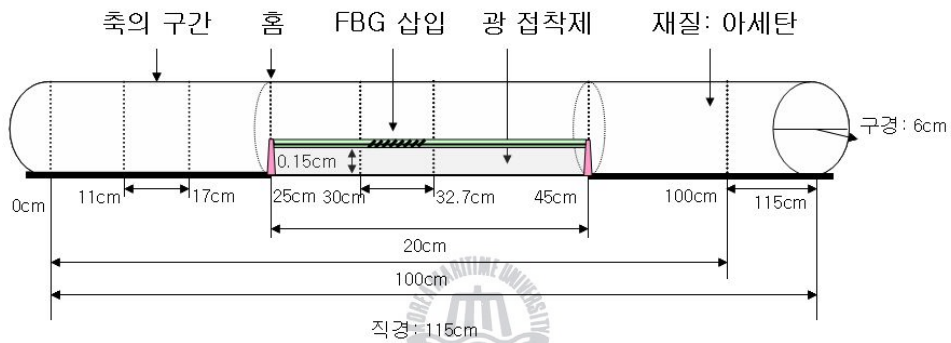
전체길이가 115cm이고 구경이 6cm인 캔틸레버를 준비한 후 25cm부터 45cm 구간 사이 깊이 1cm의 홈을 낸다. 이 때 일정한 깊이 및 수직이 되도록 정밀하게 가공을 해야 한다. 홈을 깨끗이 닦은 후 1535.4nm인 FBG를 삽입 후 쉽게 떨어지지 않도록 광 접착제로 부착시킨다. 광 접착제 경화를 위해 UV로 2시간 경화 시킨 후 캔틸레버로 사용한다. FBG 센서가 삽입 완료된 캔틸레버의 모형이 <그림 4-1>, <그림 4-2>, <그림 4-3>에 나타나 있다.

여기에 캔틸레버의 끝단에 전체 길이가 70cm 인 Buoy를 연결시킨다. 물통 속에 Buoy가 물의 출렁임이나 외부 충격에 의한 좌, 우 이동을 방지하기 위해서 125cm인 축을 좌, 우에 세워 두는데 좌우 간격은 39cm 이며 축의 위, 아래 옆 부분은 개방된 상태이다. Buoy가 좌, 우 흔들림 없이 위, 아래로 움직일 수 있도록 Buoy 끝 양단에 얇은 Buoy를 설치 및 설치된 좌, 우 축 속에 삽입시켜 준다. 끝으로 캔틸레버를 고정 시켜 주기 위해 125cm인 고정 지지대에 삽입시킨다[12][13].

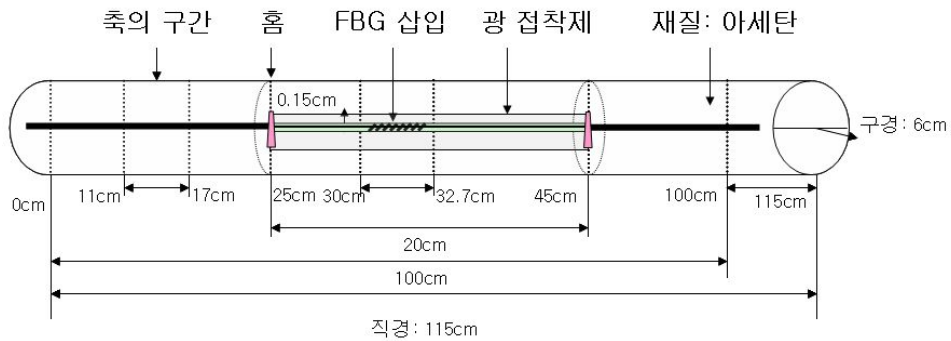
FBG 센서의 수위 검출기 실험 장치는 <그림 4-4>과 같다[14][15].



<그림 4-1> 캔틸레버 위 부분에 FBG 센서 Package



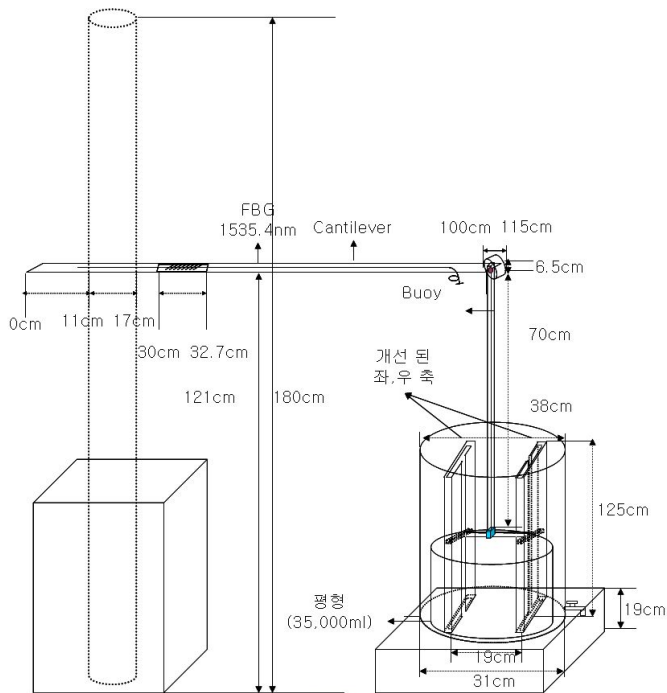
<그림 4-2> 캔틸레버 아래 부분에 FBG 센서 Package



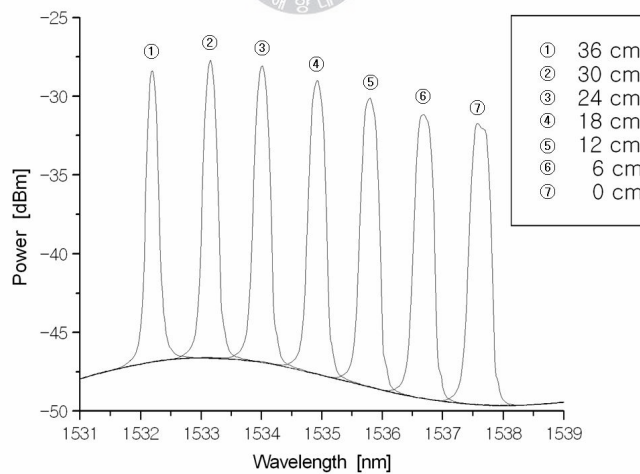
<그림 4-3> 캔틸레버 옆 부분에 FBG 센서 Package

FBG 센서에 변형을 가하기 위해 물 탱크 속 수위 변화를 0~42cm, 7 구간으로 나누어서 수위 변화에 따른 FBG 센서의 변형을 2회 반복 및 캔틸레버에

FBG 센서 부착 위치 위, 아래, 옆 부분에 대한 변형률에 대해 실험해 보았다.

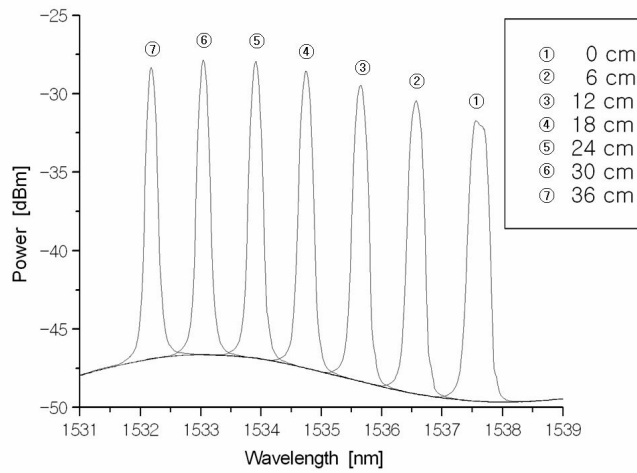


<그림 4-4> FBG 센서의 수위 검출기 실험 장치

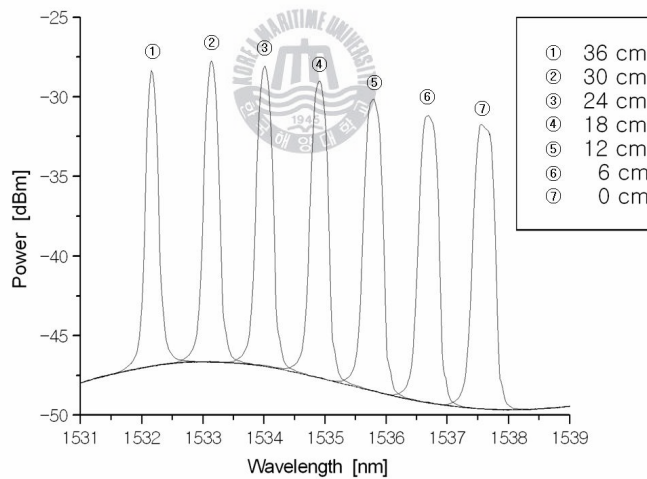


a. 1회 감소

<그림 4-5> FBG 센서를 캔틸레버 위 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼 (계속)

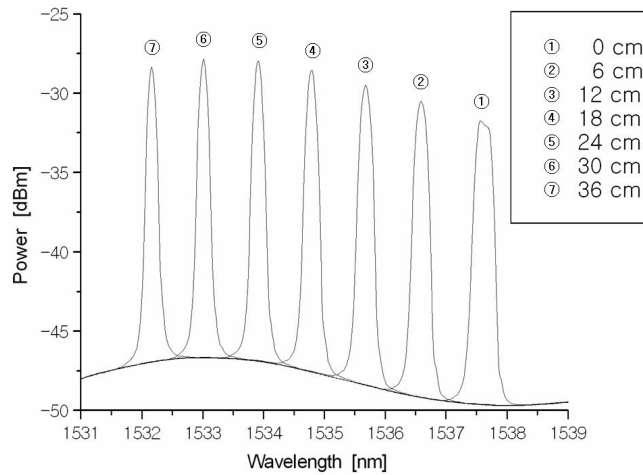


b. 1회 증가



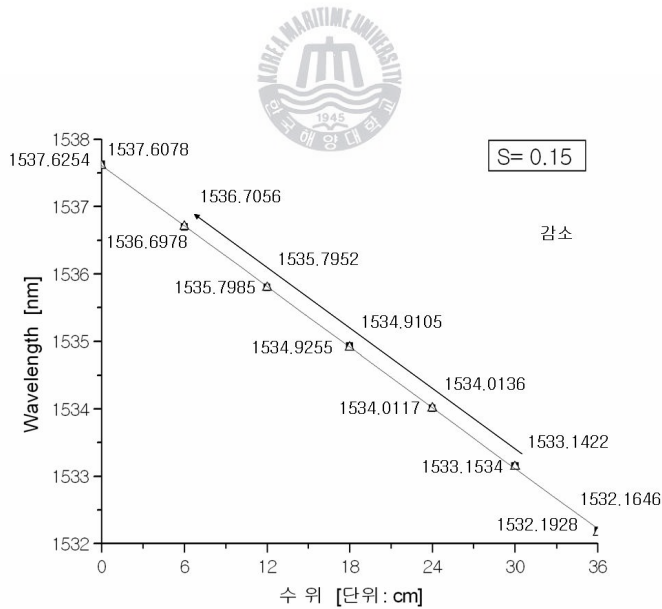
c. 2회 감소

<그림 4-5> FBG 센서를 캔틸레버 위 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼 (계속)



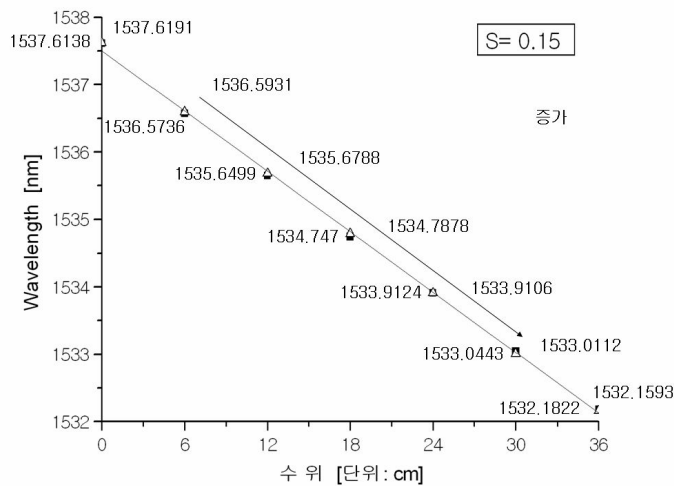
d. 2회 증가

<그림 4-5> FBG 센서를 캔틸레버 위 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼



a. 감소

<그림 4-6> FBG 센서를 캔틸레버 위 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼 분석 (계속)

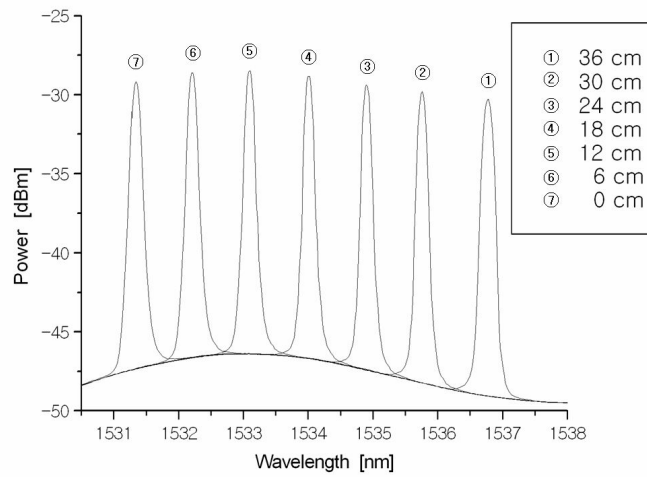


b. 증가

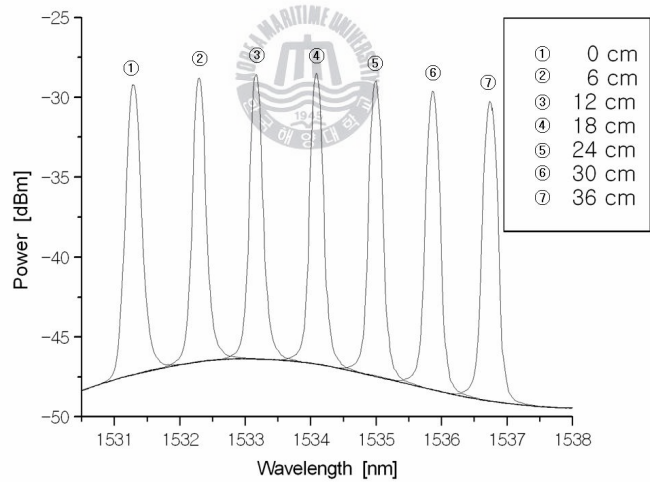
<그림 4-6> FBG 센서를 캔틸레버 위 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼 분석

<그림 4-5>, <그림 4-6>은 FBG 센서를 캔틸레버 위 부분에 부착한 것이며 <그림 4-5>은 수위의 증가 및 감소에 따른 FBG 센서의 변형률을 스펙트럼으로 나타낸 것이고, <그림 4-6>은 수위 증가 및 감소에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼 분석을 나타낸 것이다.

<그림 4-7>, <그림 4-8>은 FBG 센서를 캔틸레버 위 부분에 부착한 것이며 <그림 4-7>은 수위의 증가 및 감소에 따른 FBG 센서의 변형률을 스펙트럼으로 나타낸 것이고 <그림 4-8>은 수위 증가 및 감소에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼 분석을 나타낸 것이다.

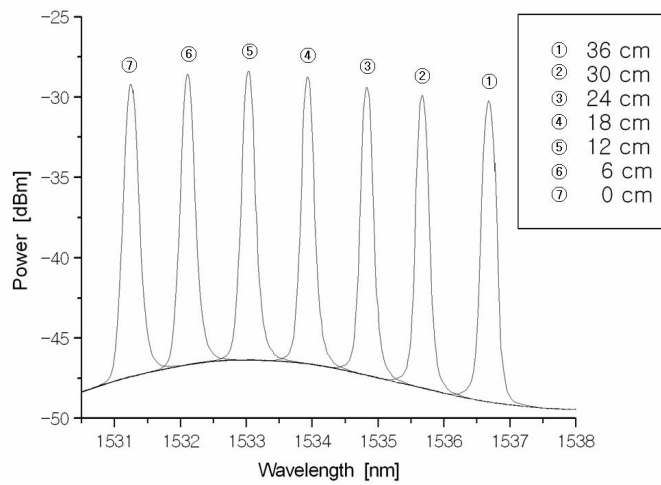


a. 1회 감소

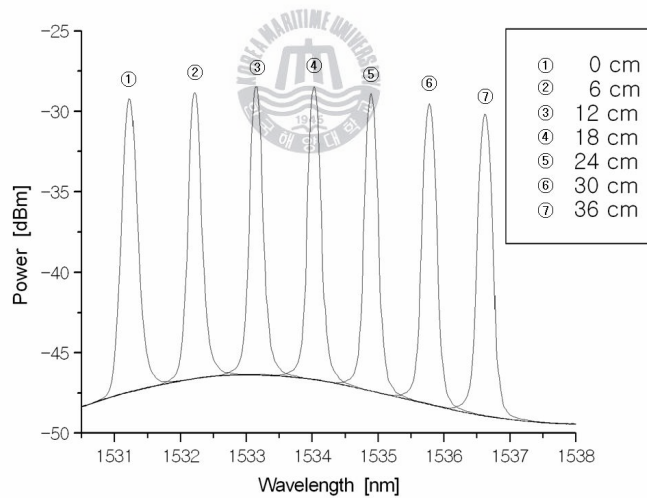


b. 1회 증가

<그림 4-7> FBG 센서를 캔틸레버 아래 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼 (계속)



c. 1회 감소

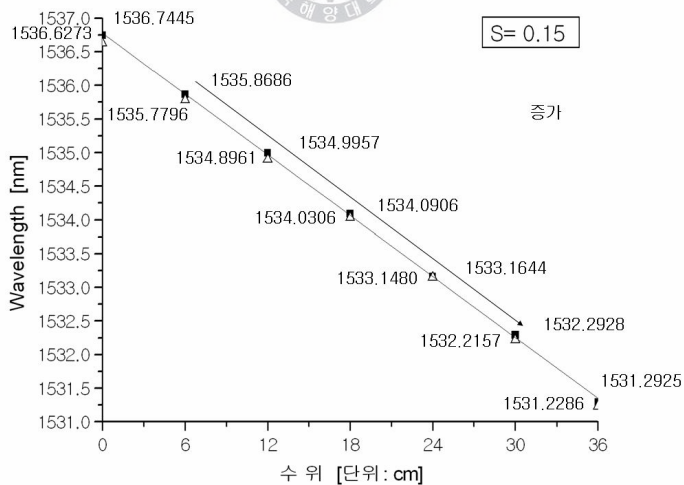
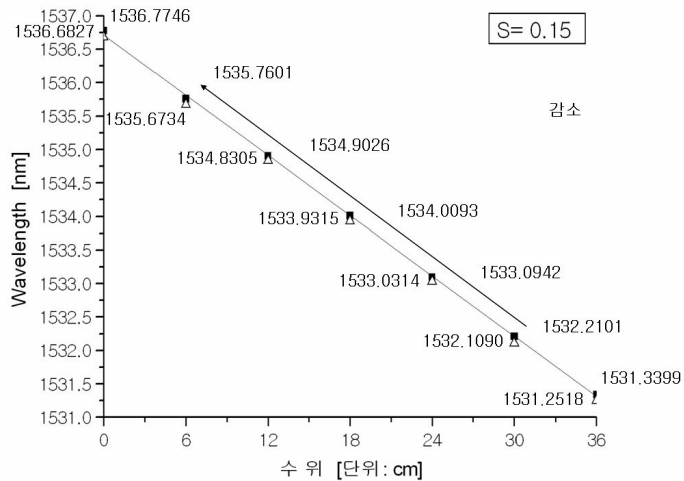


d. 1회 증가

<그림 4-7> FBG 센서를 캔틸레버 아래 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼

<그림 4-7>, <그림 4-8>은 FBG 센서를 캔틸레버 위 부분에 부착한 것이며

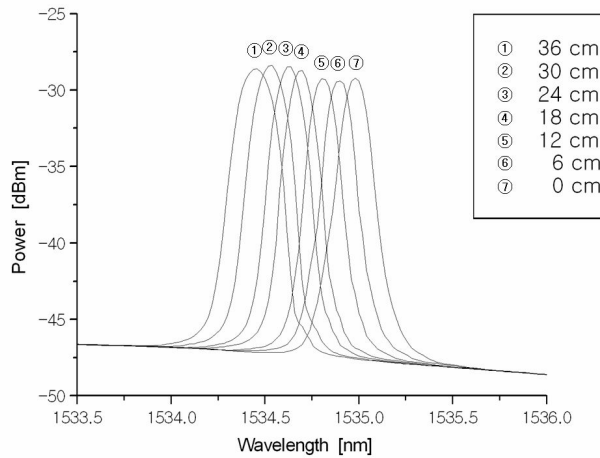
<그림 4-7>은 수위의 증가 및 감소에 따른 FBG 센서의 변형률을 스펙트럼으로 나타낸 것이고 <그림 4-8>은 수위 증가 및 감소에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼 분석을 나타낸 것이다.



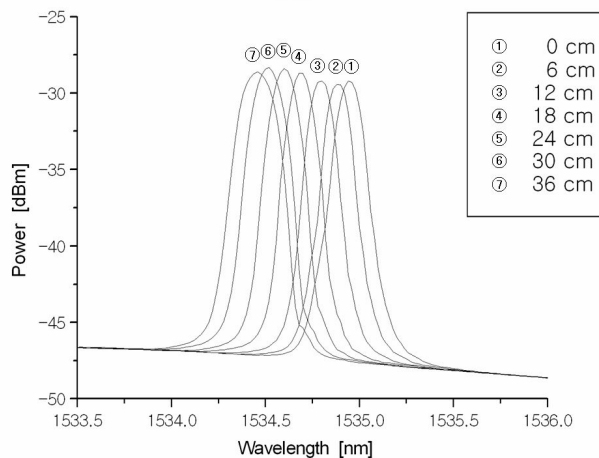
b. 증가

<그림 4-8> FBG 센서를 캔틸레버 아래 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼 분석

<그림 4-9>, <그림 4-10>은 FBG 센서를 캔틸레버 옆 부분에 부착한 것이며 <그림 4-9>은 수위의 증가 및 감소에 따른 FBG 센서의 변형률을 스펙트럼으로 나타낸 것이고 <그림 4-10>은 수위 증가 및 감소에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼 분석을 나타낸 것이다.

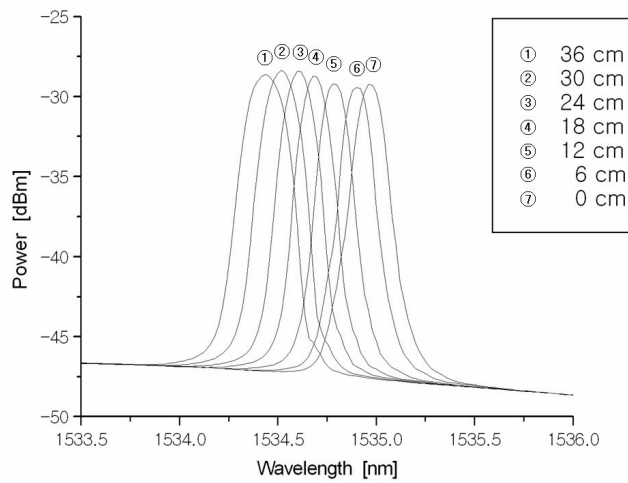


a. 1회 감소

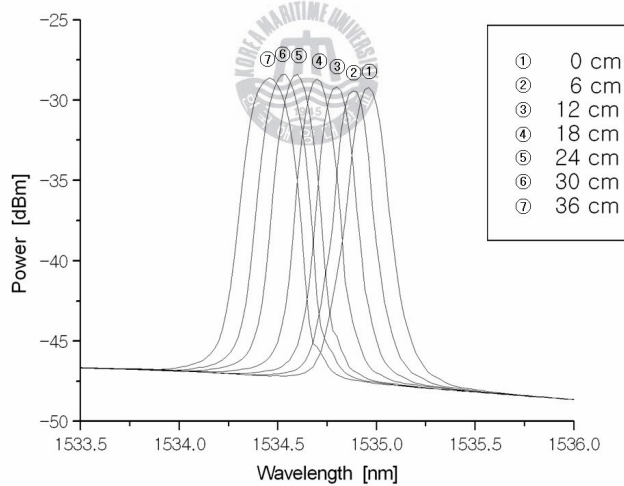


b. 1회 증가

<그림 4-9> FBG 센서를 캔틸레버 옆 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼 <계속>

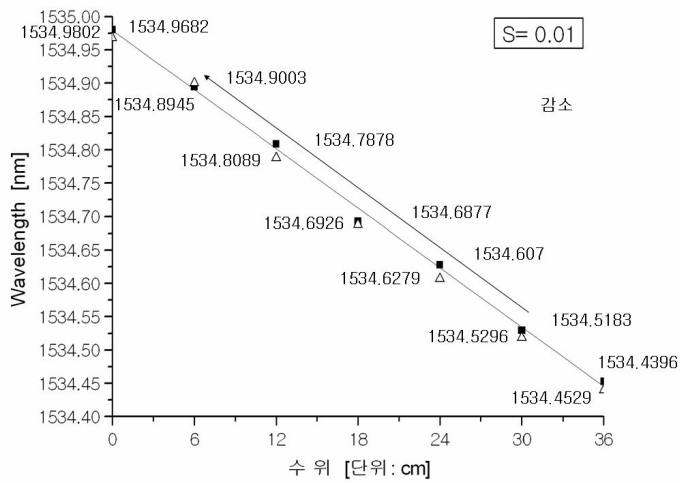


c. 2회 감소

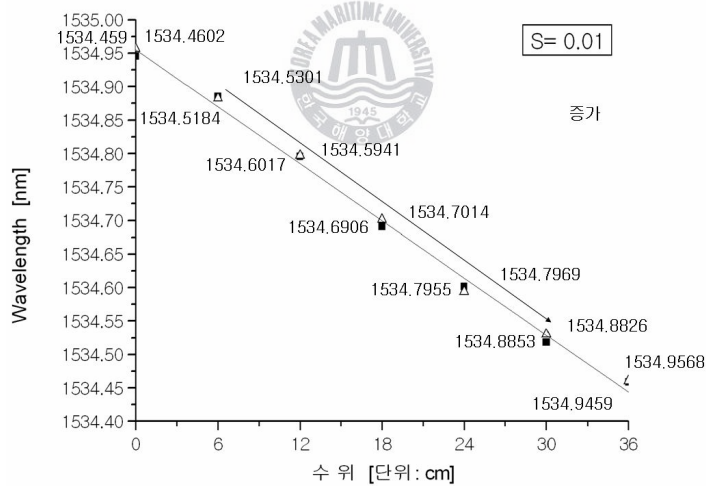


d. 2회 증가

<그림 4-9> FBG 센서를 캔틸레버 옆 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼



a. 감소



b. 증가

<그림 4-10> FBG 센서를 캔틸레버 옆 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 FBG 센서의 변형률 스펙트럼 분석

4.2 실험 결과 및 분석

<그림 4-5> ~ <그림 4-10> 까지 캔틸레버에 FBG 센서 부착 위치 위, 아래, 옆 부분에 대한 변형률에 대해 실험해 보았다. FBG 센서 부착 위치가 위, 아래, 옆 부분에서의 변형률 스펙트럼 및 스펙트럼 분석을 통해 감도가 우수한 것은 위, 아래, 옆 부분 순이다. 변형률 스펙트럼과 같은 경우 그래프간의 격차 간격이 크게 보이지 않은 이유는 실험 대상의 중심과장 단위가 nm 단위이고 수위 레벨 또한 0~36cm 즉 레벨 폭이 낮다 보니 변형률 스펙트럼 변화가 미세하게 보이는 것이다. 이것을 보완하기 위해 변형률 스펙트럼을 분석하였고 여기서 획득한 데이터 자료를 통해 명확하게 그래프화 시키면서 데이터가 선형적으로 변화된다는 것을 알 수 있었다.

특히 FBG 센서가 캔틸레버의 위, 아래 부분에 패키지화 되어 있을 때 감도가 측면 부분에 패키지화 되어 있을 때보다 크다는 것을 변형률 스펙트럼과 변형률 스펙트럼 분석을 통해 알 수 있다. 이것은 FBG 센서가 위, 아래 부분에 패키지화 되어 있을 때 수위 레벨 센서로서의 역할을 충분히 할 수 있다고 판단할 수 있다.

이 실험을 통해 FBG 센서 수위 검출기가 완성되었고 이것을 바탕으로 FBG 센서를 이용한 수위 검출기 실험 모니터링 시스템 개발할 때 최적화된 캔틸레버와 FBG 패키지를 통해 정확하고 신속한 데이터를 습득할 수 있다고 판단된다.

제 5 장 FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템 개발

5.1 실험 개요 및 방법

앞서 실험한 FBG 센서의 변형률 측정 실험과 FBG 센서의 수위 검출기 실험을 통해 변위에 변화에 따른 변형률 및 수위 변화에 따른 신호를 측정 할 수 있는 FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템 개발을 하였다. 개발된 FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템은 반사된 ASE source 출력 파장이 광 신호의 세기가 아닌 전기적인 신호로 변화시킴으로서 실시간 변형률을 감지하여 수위 레벨을 알아낼 수 있는 프로그램을 개발 하였다[15][16].

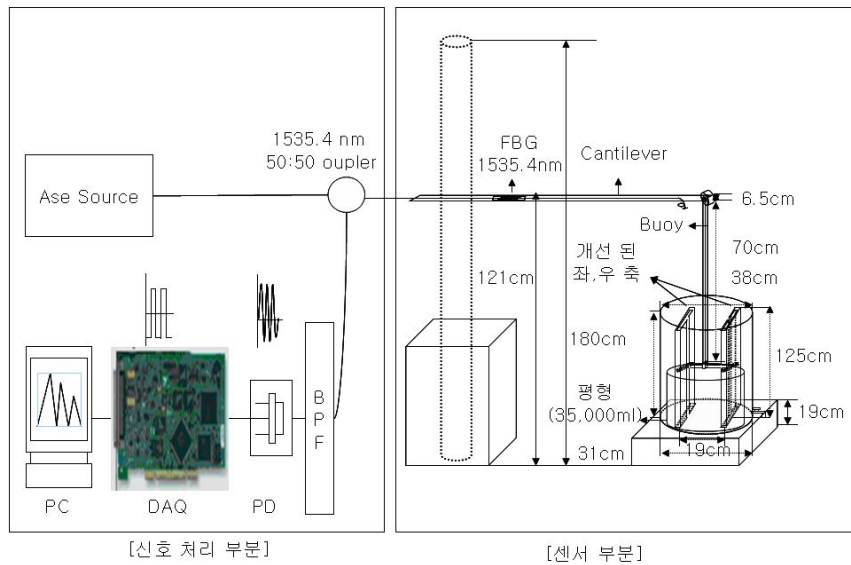
FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템 개발을 위해 구성은 <그림 5-1>와 같다. 반사된 ASE source 출력 파장이 나올 수 있도록 구성한 시스템에 에지 필터를 복조기로 사용하고 있다. 광원 출력은 에지 필터를 통과 시켜 광섬유 브래그 격자 센서에 입사시킴으로써 센서에서 반사되어 돌아온 시간 영역에서의 신호를 파장 영역으로 상사 시킬 수 있으므로 변형률 측정에 이용이 가능하다.

반사된 파장의 전기적인 신호가 처음, 중간 또는 끝 부분에서 균등하지 않고 비선형성이 나타날 수 있다. 이러한 비선형은 에지 필터를 통과한 ASE Source가 에지 필터가 인가 받은 전압에 일치하지 않거나 비선형적으로 거동하기 때문에 일어나는 현상이다. 따라서 FBG 센서의 중심파장을 비선형성이 없는 부분에 위치시키거나 에지 필터의 전압을 일치 시켜 주어야 한다.

본 연구에서는 FBG 센서의 수위 검출기 실험에서 <그림 4-5>, <그림 4-7>, <그림 4-9> 을 통해 에지 필터의 범위를 지정할 수 있었다.

또한 브래그 파장이 1535.4nm인 광섬유 브래그 격자를 기준으로 설정하여 실

제 변형률 측정에 이용되는 센서들의 파장 변이 측정 시 이용 하였다.



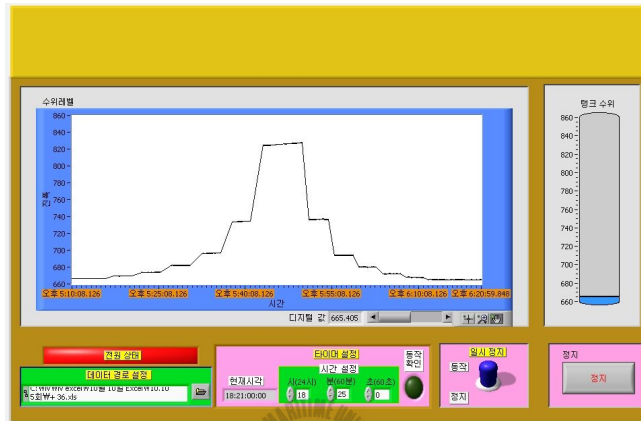
<그림 5-1> FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템



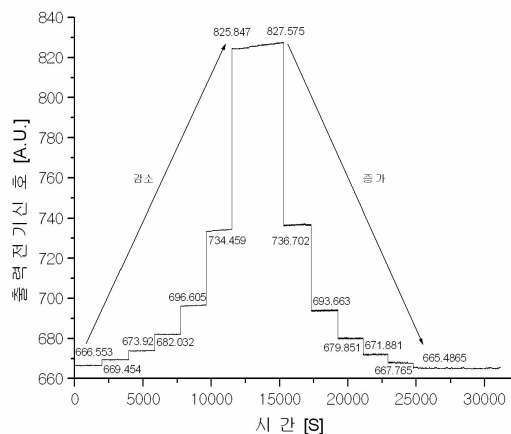
<그림 5-2> FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템 실험에 사용된 장비

<그림 5-1>에서 에지필터를 복조기로 사용한 광섬유 브래그 격자를 부가하였고 수위 레벨의 변형 신호를 광 신호 세기에서 전기적인 신호로 변환 시켜 주기 위해 광검출기를 연결 후 데이터를 데이터 수집 보드(DAQ Acquisition Board)를 통해 얻을 수 있도록 하였다[17].

<그림 5-2>는 실험을 위해 제작된 FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템 개발 장비들의 구성 모습이다.

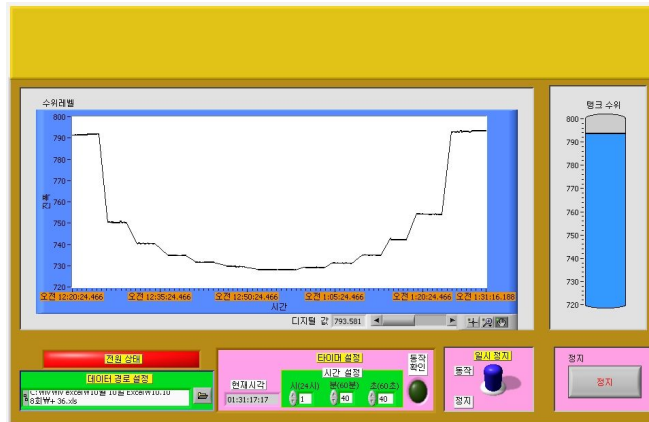


<그림 5-3> FBG 센서를 캔틸레버 위 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 실시간 모니터링 시스템

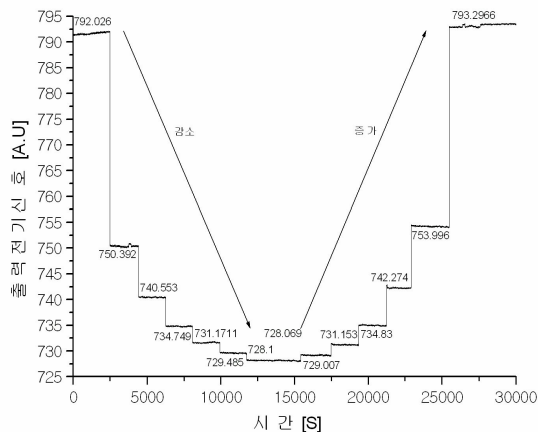


<그림 5-4> FBG 센서를 캔틸레버 위 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 실시간 모니터링 시스템에서 나온 데이터 분석

<그림 5-3>, <그림 5-4>은 수위가 감소 할 때 FBG 센서의 간격이 장 방향으로, 수위가 증가 할 때는 FBG 센서의 간격은 단방향으로 이동함으로서 FBG 센서가 패키지화된 캔틸레버에서도 동일한 데이터를 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

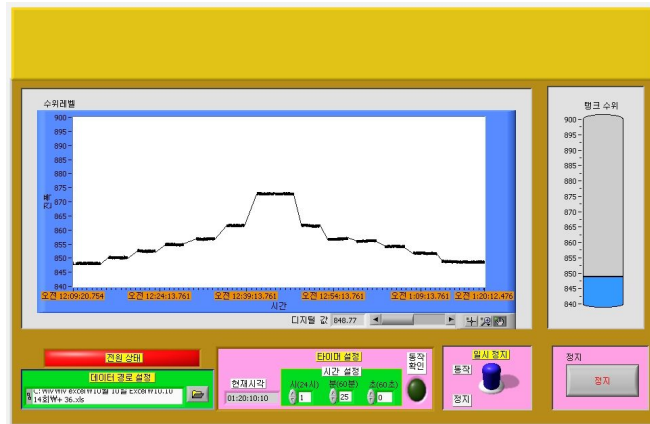


<그림 5-5> FBG 센서를 캔틸레버 아래 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 실시간 모니터링 시스템

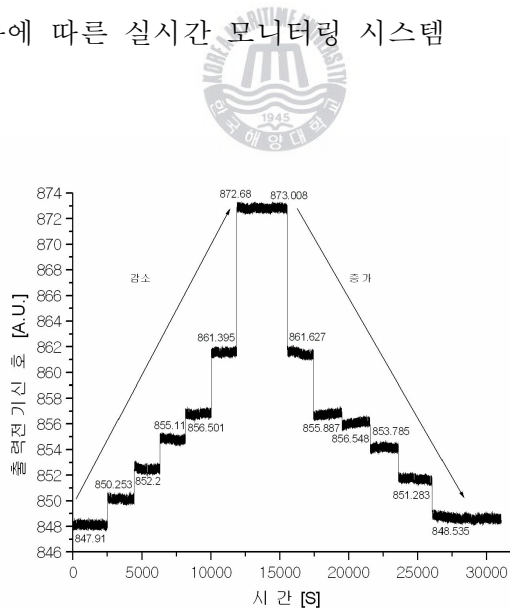


<그림 5-6> FBG 센서를 캔틸레버 아래 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 실시간 모니터링 시스템에서 나온 데이터 분석

<그림 5-5>, <그림 5-6>에서는 <그림 5-3>, <그림 5-4>와 반대로 캔틸레버 아래 부분에 FBG 센서가 삽입된 상태이므로 수위가 감소 할 때 단 방향으로 수위가 증가 할 때 장 방향으로 이동하는 모습을 볼 수 있다.



<그림 5-7> FBG 센서를 캔틸레버 옆 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 실시간 모니터링 시스템



<그림 5-8> FBG 센서를 캔틸레버 옆 부분에 설치 후 수위 증가 및 감소 변화에 따른 실시간 모니터링 시스템에서 나온 데이터 분석

<그림 5-7>, <그림 5-8>에서는 캔틸레버 옆 부분에 FBG 센서가 삽입되어 있으므로 상대적으로 위, 아래 부분에서 발생하는 변형률 보다 낮다는 것을 알 수 있다.

5.2 실험 결과 및 고찰

FBG 센서의 변형률 측정 실험과 FBG 센서의 수위 검출기 실험을 사용하여 실시간으로 FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템을 통해 물의 수위 변화에 의해 캔틸레버가 변형을 받았을 때 수위 레벨로 인식 하도록 LabVIEW 프로그래밍 언어로 제작된 프로그램이 개발되었다.

FBG 센서가 캔틸레버의 위, 아래 부분에 설치되어 있을 때 그래프를 비교해 보면 데이터 값과 그래프의 크기가 비슷하다는 것을 알 수 있다. 이것을 통해 FBG 센서가 캔틸레버 위, 아래 부분에 설치되어 있을 때도 비슷한 데이터를 얻을 수 있다는 것과 감도가 좋으므로 센서로 사용하기 적합하다고 판단 할 수 있다. 그와 반대로 FBG 센서가 캔틸레버의 옆 부분에 설치된 경우 그래프와 데이터 값이 낮다는 것을 육안으로 알 수 있다. 감도가 낮다는 것은 센서로서 옆 부위에 FBG 센서를 삽입하여 사용하기에는 위, 아래 옆 부분에 비해 센서로서 떨어진다는 것을 판단 할 수 있다.

이 자료를 바탕으로 감도가 높은 부위에 FBG 센서를 캔틸레버에 삽입하여 센서로서 사용을 해야 할 것이다.

또한 수위 변화에 의한 FBG 센서가 변형 될 때 동시에 신호를 취득하기 위해 수위를 검출하는 프로그램 내에 LabVIEW로 작성된 그래프를 삽입 및 데이터를 저장 할 수 있는 저장 폴더, 타이머를 통한 시간 제어, 일시 정지 버튼 등을 디자인하였다.

그 결과 실시간으로 수위 변화에 따른 FBG 센서가 변형이 되었을 때 신호 데이터를 획득 할 수 있었고 파일을 저장함으로서 기록 보존에 있어 편리함과

데이터 비교 시 시간 단축의 용이함을 있는 것을 확인 하였다.

<그림 5-3>, <그림 5-4> <그림 5-5> 은 실 시간으로 수위 변화에 따른 수위 레벨 검출하고 동시에 수위 레벨을 알아 볼 수 있는 프로그램을 나타내고 있다.



제 6 장 결론

본 논문에서는 FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템에서 수위 레벨 변화를 실시간으로 측정할 수 있는 광섬유 브래그 격자 세서 시스템을 개발하였다. 신호를 처리하는 에지 필터, 광검출기, 데이터 수집 보드 부분과 신호를 얻는 캔틸레버와 Buoy, 물탱크로 구성되어 있다.

광원 출력을 광섬유 격자 센서들에 입사한 후 센서에서 반사되어 돌아온 시간 영역에서의 신호는 에지 필터(Edge Filter)를 통과 시켜 파장 영역으로 상기시킬 수 있으므로 변형률 측정에 이용이 가능하다. 복조기로 사용된 에지 필터는 인가되는 변조 전압에 대해 비선형적으로 거동할 수 있으므로 본 논문에서는 에지 필터의 범위 지정 및 비선형성이 없는 부분에 위치시킨다. 또한 브래그 파장이 1535.4nm인 광섬유 브래그 격자를 기준으로 설정하여 실제 변형률 측정에 이용되는 센서들의 파장 변이 측정 시 이용하였다.

FBG 센서를 이용한 수위 모니터링 시스템 개발을 하기 전에 FBG 센서의 수위 검출기 실험을 하였다. FBG 센서의 수위 검출기 실험에서는 중심 파장이 1535.4nm, FBG 센서와 캔틸레버를 Package 시켜 제작하였다. 이로써 정확한 수위 레벨 측정을 할 수 있게 된다. 또한 FBG 센서의 수위 검출기 실험에서는 광섬유 라인에 벤딩이나 온도 변화 등과 같은 외부 환경에 의해 광 세기가 변하기 때문에 측정 시 마다 광 세기가 달라지는 경우가 생긴다. 이를 해결하기 위해 캔틸레버에 삽입된 FBG 센서의 위치를 위, 아래, 옆 부분에 삽입하여 각각 실험 통하여 얻은 데이터를 통해 이런 문제를 해결 할 수 있었다.

FBG 센서의 변형률 측정 실험에서는 중심 파장이 1545.2nm FBG 센서를 이용하여 변위 변화에 대한 FBG 센서 변형률 변화를 실험해 보았다. 고정점과 FBG 센서 사이 거리 변화 및 변위에 대한 변형률에서 고정점과 FBG 센서 사이 거리가 10cm 일 때 최고 변형률은 $565\mu\epsilon$ 이고 FBG 센서 사이 거리가 2cm 일 때 최고 변형률은 $658\mu\epsilon$ 이다. 벤딩 받는 부분에 FBG 센서가 가까워 질수

로 변형률이 커지면서 감도가 좋아진다는 것을 알 수 있고 이를 통해 FBG 센서의 정확한 감도를 얻기 위해서는 벤딩을 크게 받는 곳에 FBG 센서를 설치해 야만이 정확한 감도를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

FBG 센서의 온도 변화 측정 실험에서는 1554.3nm FBG 센서를 이용하여 온도 변화에 대한 FBG 센서 변형률 변화를 실험해 보았다. 실험에서 0℃~24 0℃ 사이에 40℃ 온도 변형을 주었을 때 370 $\mu\epsilon$ 의 변형을 준 것이라고 볼 수 있다. 따라서 FBG 센서에 370 $\mu\epsilon$ 의 변형이 생겼을 때 40℃에 해당하는 온도 변화가 생긴 것이다.

이상과 같은 실험을 통하여 수위 모니터링 시스템을 구성 및 수위 모니터링 시스템을 개발 하였고 캔틸레버의 부위 별 각각의 FBG 센서를 위, 아래, 옆 부분에 설치 후 실험 결과를 통해 FBG 센서가 삽입된 캔틸레버에서 위치에 따른 감도 특성이 다르다는 것을 알 수 있고 이를 이용해서 부분 별 실시간으로 수위 레벨 변형률을 검출하고 수위 레벨 등을 취득할 수 있는 프로그램을 개발하였다.



참고문헌

- [1] 한라레벨 (주) 홈페이지, <http://www.hanlalevel.co.kr/>
- [2] 송지용, “광섬유 브래그 격자 세서를 이용한 복합재 날개 모델의 저주파 및 고주파 동적 변형률의 동적 변형률의 동시 측정”, 석사학위 논문, 2006.
- [3] 장격탁, “콘크리트 보의 광섬유 센서 적용성과 철근비의 변화에 따른 파괴 형태에 관한 연구”, 석사학위 논문, 2006.
- [4] 황해성, “PDA와 광섬유 센서를 이용한 교량의 무선계측 시스템 개발”, 공학박사 논문, 2007.
- [5] 김진양, “주행 중인 차량의 동적하중 측정에 관한 연구”, 석사학위 논문, 2007.
- [6] 서동남, “FBG 센서를 내장한 스마트 앵커의 개발과 하중전이 해석”, 석사학위 논문, 2008.
- [7] Yong Zhao, Chengbo Yu, Yanbiao Liao, “Differential FBG sensor for temperature-compensated high-pressure(or displacement) measurement”, Optics & Laser Technology 36, pp.39-42, 2004.
- [8] Jean Carlos Cardozo da Silva, Cicero Martelli, Hypolito Jose Kalinowski, Elisabeth Penner, Hohn Canning, Nathaniel Groothoff, “Dynamic analysis and temperature measurements of concrete cantilever beam using fibre Bragg gratings”, Optics and Lasers in Engineering 45, pp.88-92., 2007.
- [9] Bo Dong, Qida Zhao, Luming Zhao, Long Jin, Yiping Miao, Tongqing Liao, Xiangye Zeng, “Simultaneous measurement of temperature and force based on a special-strain-function-chirped FBG”, Sensors and Actuators A 147, pp.169-172, 2008.
- [10] A. Di Maio, A. Rocco, P. ferraro, M. De Rosa, P. De Natale, S. De Nicola, A. Finizio, G. Pierattini, G. Coppola, M. Iodice, V. Striano,

- "Performance evaluation of fiber Bragg grating sensors by digital holographic technique, strain gauge measurement", *Optics and Lasers in Engineering* 45, 385-389, 2007.
- [11] Yong Zhao, Yan Zhao, Mingguo Zhao, "Novel force sensor based on a couple of fiber Bragg gratings", *measurement* 38,, pp.30-33, 2005.
- [12] Yong Zhao, Jian Yang, Bao-Jin Peng, Shi-Yuan Yang, "Experimental research on a novel fiber-optic cantilever-type inclinometer", *Optics & Laser Technology* 37, pp.555-559, 2005.
- [13] Tuan Guo, Qida Zhao, Qingying Dou, Hao Zhang, Lifang Xue, Guiling Huang, and Xiaoyi Dong, "Temperature-Insensitive Fiber Bragg Grating Liquid-Level Sensor Based on Bending Cantilever Beam", *IEEE Photonics Technology Letters*. vol. 17, No. 11, November 2005
- [14] A. kerrouche, W.J.O. Boyle, Y. Gebremihael, T. Sun, K.T.V. Grattan, B. Taljsten, A. Bennitz, "Field tests of fibre Bragg grating sensors incorporated into CFRP for railway bridge strengthening condition monitoring", *Sensors and Actuators A* 148, pp.68-74, 2008.
- [15] Mousumi Majumder, Tarun Kumar Gangopadhyay, Ashim Kumar Chakraborty, Kamal Dasgupta, D.K. Bhattacharya, "Fibre Bragg gratings in structural health monitoring-present status and applications", *Sensors and Actuators A* 147, pp. 150-164, 2008
- [16] T. Venugopalan, T. Sun, K.T.V. Grattan, "Long period grating-based humidity sensor for potential structural health monitoring", *Sensors and Actuators A* 148, pp.57-62, 2008.
- [17] P. Niewczas, A. J. Willshire, L. Dziuda, and J. R. McDonald, "Performance Analysis of the Fiber Bragg Grating Interrogation System Based on an Arrayed Waveguide Grating", *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, vol. 53, No. 4, August 2004.

감사의 글

학위 논문이 나오기 까지 많은 분들께서 도움을 주셨습니다. 그 분들에게 감사의 말을 전하고 싶습니다. 지난 2년간 석사과정을 통하여 부족한 저를 연구자의 자세와 마음가짐, 행동을 보여주신 심 준환 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 교수님의 폭 넓은 지식, 새로운 기술과 정보, 이해심, 자상함, 제자를 사랑하는 마음이 있었기에 학위 논문이 완성 되었습니다. 본 논문의 심사를 통하여 아낌없는 조언을 해주신 김 기문 교수님과 양 규식 교수님께 진심으로 감사드립니다.

실험을 통하여 원하는 데이터가 나오지 않을 때 마다 아낌없는 가르침과 더불어 주저않은 저를 일으켜 주시고 희망을 주신 손 경락 교수님께 감사드립니다.

처음 실험실에 들어와서 졸업하는 순간까지 같이 땀 흘리며 물신양면으로 저를 도와주신 실험실 동기이자 형인 찬 주광 형에게 감사의 말을 전하고 싶습니다.

석사과정 2년 동안 정신적인 선배이자, 석사 생활 및 실험에 조언을 아끼지 않은 98학번 최홍석 선배님과 LabVIEW P/G Design 할 때 고비가 있을 때 마다 고비를 지혜롭게 넘어갈 수 있도록 도와주신 88학번 이길종 선배님, 이 논문을 완성하기 위해 행정적, 물질적으로 도와주신 93학번 주현진 선배님께 감사의 말을 하고 싶습니다.

지금의 제가 있기까지 저를 아끼고 믿어 주신 우리 가족 모두에게 감사를 드립니다. 성실함, 정직함으로 인생을 걸어오신 어머니, 어머니를 도와 집안을 꾸밈하게 이끌어 나가시는 형님, 도덕적 밝은 마음과 늘 어머니 같이 따뜻하고 신세계를 보여주신 큰 누나, 어릴 때부터 지금까지 미래 지향적인 교육을 뒷받침 해주신 작은 누나, 집안의 대소사를 어머니를 도와 예쁜 가정을 가꾸시는 형수님과 형제들에게 매일 같이 함박웃음과 귀여움을 선사하는 조카들, 긍정적인 마음과 매일 같이 사랑을 주는 여자친구에게 감사의 말을 전하고 싶습니다.